

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Analógové modulace v telekomunikacích
Analog Modulation in Telecommunications

2013

Tomáš Skutka

Zadání bakalářské práce

Student:

Tomáš Skutka

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Analogové modulace v telekomunikacích
Analog Modulation in Telecommunications

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je zhodnotit vývoj a trendy používaných analogových modulací v telekomunikačních sítích. Součástí práce bude i jednoduchá realizace vybrané analogové modulace na výukovém systému TIMS formou návodu pro laboratorní měření. Práce má řešeršní charakter ve formě vytvoření přehledu a analýzy analogových modulací používaných v telekomunikačních sítích.

Osnova:

1. Přehled a význam modulací v telekomunikačních sítích.
2. Popis analogových modulací v telekomunikacích.
3. Realizace modulací formou měření.
4. Zpracování podrobných analýz formou návodů a protokolů.

Seznam doporučené odborné literatury:

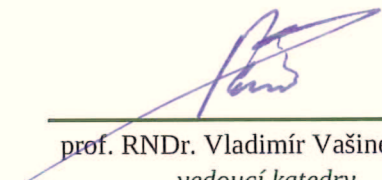
Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

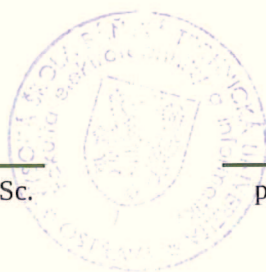
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Přemysl Mer, Ph.D.**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

Dňa: 6. 5. 2013



.....
podpis študenta

Pod'akovanie

Rád by som pod'akoval Ing. Přemyslu Merovi, Ph.D. za odbornú pomoc a konzultáciu pri vytváraní tejto bakalárskej práce.

Abstrakt

Analógové modulácie stáli za rozvojom telekomunikácií počas celého dvadsiateho storočia. V rámci tejto bakalárskej práce sú teoreticky spracované základné typy analógových modulácií ako amplitúdová modulácia, frekvenčná modulácia, fázová modulácia a zložená kvadrátúrna amplitúdová modulácia a ich využitie v telekomunikáciách. Praktická časť bakalárskej práce je realizovaná prostredníctvom meraní uskutočnených na výukovom systéme TIMS. Tieto merania sa zaoberajú veľkosťou amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na zmene veľkosti amplitúdy modulačného signálu Zero crossing demodulátora a Phase locked loop demodulátora a veľkosťou amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na zmene šírky pulzu využívaného v Zero crossing demodulátore.

Kľúčové slová

Amplitúdová modulácia, Frekvenčná modulácia, Fázová modulácia, Kvadrátúrna amplitúdová modulácia, Zero crossing demodulátor, Phase locked loop demodulátor

Abstract

Analog modulation stood for the development of telecommunications during the twentieth century. In the framework of this bachelor thesis are theoretically processed basic types of analog modulation such as amplitude modulation, frequency modulation, phase modulation and multiple quadrature amplitude modulation and their usage in telecommunications. Practical part of the bachelor thesis is realized through measurements performed on learning system TIMS. These measurements dealing with the size of demodulated signal amplitude, depending on the size of change in the amplitude modulation signal in Zero Crossing Demodulator and Phase locked loop demodulator and the magnitude of demodulated signal amplitude, depending on the change in pulse width used in Zero crossing demodulator.

Key words

Amplitude modulation, Frequency modulation, Phase modulation, Quadrature amplitude modulation, Zero crossing demodulator, Phase locked loop demodulator

Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
$m(t)$	-	Modulačný signál
$a(t)$	V	Amplitúda modulačného signálu
$\omega(t)$	Hz	Uhlová frekvencia
$\varphi(t)$	rad	Počiatková fáza
$u_{AM}(t)$	-	Amplitúdovo modulovaný signál
m_a	-	Činiteľ amplitúdovej modulácie
$f_{m \max}$	Hz	Maximálna modulačná frekvencia
f_c	Hz	Nosná frekvencia
$m_a \%$	%	Hĺbka modulácie
U_m	V	Amplitúda modulačného signálu
f_m	Hz	Modulačná frekvencia
U_c	V	Amplitúda nosného signálu
U_{\max}	V	Maximálna amplitúda
U_{\min}	V	Minimálna amplitúda
k_{AM}	-	Amplitúdová citlivosť modulátora
k_{FM}	Hz/V	Frekvenčná citlivosť modulátora
k_{PM}	rad/V	Fázová citlivosť modulátora
$\Theta_i(t)$	rad	Okamžitá fáza
$f_i(t)$	Hz	Okamžitá frekvencia
$u_{FM}(t)$	-	Frekvenčne modulovaný signál
$u_{PM}(t)$	-	Fázovo modulovaný signál
Δf	Hz	Frekvenčná deviácia signálu
β_{FM}	-	Index frekvenčnej modulácie
D	-	Deviačný pomer
Δf_{\max}	Hz	Maximálny frekvenčný zdvih
B_m	Hz	Šírka pásma
β_{PM}	-	Index fázovej modulácie
$e(t)$	V	Obálka AM signálu
T	s	Periódna signálu

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Anglický význam	Slovenský význam
V	Volt	Volt
V_{p-p}	Volt peak-to-peak	Volt špička-špička
PAM	Pulse amplitude modulation	Pulzne amplitúdová modulácia
PWM	Pulse width modulation	Pulzne šírková modulácia
PPM	Pulse position modulation	Pulzne polohová modulácia
PFM	Pulse frequency modulation	Pulzne frekvenčná modulácia
PCM	Pulse code modulation	Pulzne kódová modulácia
D-PCM	Differential PCM	Diferenciálna PCM
AD-PCM	Adaptive modulation D-PCM	Adaptívna modulácia D-PCM
DE-PCM	Differentially encoded PCM	Diferenciálne kódovaná PCM
DM	Delata modulation	Delta modulácia
ADM	Adaptive modulation DM	Adaptívna modulácia DM
AM	Amplitude modulation	Amplitúdová modulácia
FM	Frequency modulation	Frekvenčná modulácia
PM	Phase modulation	Fázová modulácia
QAM	Quadrature amplitude modulation	Kvadratúrna amplitúdová modulácia
M-QAM	M-mary QAM	M-stavová QAM
NTSC	National television system commitee	Národný televízny systémový výbor
PAL	Phase alternating line	Fázovo striedavá linka
VKV	Very high frequency	Veľmi krátke vlny
VOR	VHF omnidirectional radio range	VKV všesmerový rádiomaják
ILS	Instrument landing system	Kurzový maják
UKV	Ultra high frequency	Ultra krátke vlny
KV	High frequency	Krátke vlny
SSB	Single-sideband	Postranné pásmo
OLT	Public Land Mobile Telephony	Verejný pozemný mobilný telefón
ARP	Car radio phone	Autotelefón
MTA	Mobile telephony system A	Mobilný telefónny systém A
MTB	Mobile telephony system B	Mobilný telefónny systém B
MTD	Mobile telephony system D	Mobilný telefónny systém D
MTS	Mobile telephony service	Mobilná telefónna služba
AMR	Automatic city radiotelephone	Automatizovaný mestský rádiotelefón

AMPS	Advanced mobile phone system	Pokročilý mobilný systém
TACS	Total access communication system	Komunikačný systém s úplným prístupom
NMT	Nordic mobile telephone	Nordický mobilný telefón
CB	Citizen band	Občianske pásmo
VHF	Very high frequency	Veľmi krátke vlny
VCO	Voltage controlled oscillator	Napätím ovládaný oscilátor
DC	Direct voltage	Jednosmerné napätie
AC	Alternate voltage	Striedavé napätie
PLL	Phase locked loop	Fázovo uzavretá slučka
ZX	Zero crossing	Nulu prekračujúci
ETACS	European total access communication system	Európsky komunikačný systém s úplným prístupom
JTAC	Japanese total access communication system	Japonský komunikačný systém s úplným prístupom
M-ASK	M-ary amplitude shift keying	M-stavovové kľúčovanie amplitúdovým zdvihom
M-PSK	M-ary phase shift keying	M-stavové kľúčovanie fázovým zdvihom
M-FSK	M-ary frequency shift keying	M-stavové kľúčovanie frekvenčným zdvihom
M-ASK/PSK	M-ary modulation with the current keying amplitude and phase carrier wave.	M-stavová modulácia so súčasným kľúčením amplitúdy a fázy nosnej vlny

Zoznam použitých termínov

Termín	Význam termínu
Modulácia	Nelineárny proces, ktorým sa mení charakter vhodného nosného signálu pomocou modulujúceho signálu
Nosný signál	Signál, ktorý sa moduluje modulačným signálom
Modulačný signál	Signál, ktorý moduluje nosný signál
Modulovaný signál	Výsledný signál po procese modulácie
Demodulácia	Proces, ktorý prevedie modulovaný signál späť na modulačný
Amplitúdová modulácia	Amplitúda modulačného signálu ovplyvňuje amplitúdu nosného signálu
Frekvenčná modulácia	Frekvencia modulačného signálu ovplyvňuje amplitúdu nosného signálu
Fázová modulácia	Fáza modulačného signálu ovplyvňuje amplitúdu nosného signálu
Diskrétna modulácia	Je daný funkciami definovanými len v diskretných časových okamihoch a tvorí tak postupnosť funkčných hodnôt
Kľúčovanie	Odobratie vzorkov signálu pri určitej frekvencii
QAM modulácia	Modulácia, pri ktorej dva modulačné signály modulujú dva nosné signály
Capture effect	Vysielanie viacerých účastníkov na rovnakom kanáli
Harmonický signál	Signál, ktorý sa dá vyjadriť funkciou $f(x)=a(t).\sin(\omega_0(t)+\varphi)$
Frekvenčná deviácia	Maximálna zmena frekvencie nosnej vlny
Deviačný pomer	Pomer maximálnej odchýlky k maximálnej modulačnej
Komparátor	Mení pôvodný analógový signál za diskretný
Index frekvenčnej modulácie	Pomer deviácie k modulačnej frekvencii
Zero crossing demodulátor	Využíva kladné prechody modulovaného signálu
Phase locked loop demodulátor	Využíva spätnoväzobnú slučku aby synchronizoval frekvenciu demodulátora s frekvenciou modulovaného signálu

Zoznam použitých obrázkov

Obrázok 2.1	Prehľad základných modulačných spôsobov používaných v rádiovkej komunikácii	2
Obrázok 4.1	Časový priebeh signálu s AM pri harmonickom modulačnom signále	6
Obrázok 4.2	Modulácia QAM: a) Časový priebeh signálu QAM; b) Fázové znázornenie signálu QAM	8
Obrázok 5.1	Časové priebehy signulov využívaných v uhlových moduláciách: a) harmonický modulačný signál $m(t)=U_m \cos(2\pi f_m t)$; b) harmonická nosná vlna $u_c(t)=U_c \cos(2\pi f_c t)$; c) FM signál; d) PM signál	11
Obrázok 6.1	Blokové schéma modulátora amplitúdovej modulácie	16
Obrázok 6.2	Schéma zapojenia modulátora amplitúdovej modulácie	16
Obrázok 6.3	Amplitúdová modulácia so 100% hĺbkou modulácie	18
Obrázok 6.4	Bloková schéma zapojenia kvadratúrnej amplitúdovej modulácie	18
Obrázok 6.5	Schéma zapojenia QAM modulácie	19
Obrázok 6.6	Vzhľad QAM modulácie pri nosnej frekvencii 100 kHz a modulačnej frekvencii 2 kHz	20
Obrázok 6.7	Schéma zapojenia kalibrácie modulu VCO	21
Obrázok 6.8	Schéma zapojenia FM modulácie	21
Obrázok 6.9	Vzhľad frekvenčnej modulácie pri nosnej frekvencii 10 kHz	22
Obrázok 7.5	Schéma zapojenia Zero Crossing demodulátora FM	23
Obrázok 7.6	Graf závislosti šírky impulzu na veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu ZX demodulátora pri nosnej frekvencii 10 kHz	24
Obrázok 7.7	Graf závislosti šírky impulzu na veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu ZX demodulátora pri nosnej frekvencii 100 kHz	25
Obrázok 7.8	Vzhľad demodulovaného signálu a pulzov pri šírke pulzu 10,64 μ s	26
Obrázok 7.9	Vzhľad demodulovaného signálu a pulzov pri šírke pulzu 15,46 μ s	26
Obrázok 7.10	Graf závislosti veľkosti amplitúdy modulačného signálu na veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu ZX demodulátora pri nosnej frekvencii 10 kHz	27
Obrázok 7.11	Graf závislosti veľkosti amplitúdy modulačného signálu na veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu ZX demodulátora pri nosnej frekvencii 100 kHz	28
Obrázok 7.12	Schéma zapojenia Phase Locked Loop demodulátora FM	29
Obrázok 7.13	Graf závislosti veľkosti amplitúdy modulačného signálu na veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu PLL demodulátora	

	<i>pri nosnej frekvencii 10 kHz</i>	30
Obrázok 7.14	<i>Vzhľad deformácie demodulovaného signálu pri nosnej frekvencii 10 kHz.</i>	31
Obrázok 7.15	<i>Graf závislosti veľkosti amplitúdy modulačného signálu na veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu PLL demodulátora pri nosnej frekvencii 100 kHz</i>	32
Obrázok 7.16	<i>Vzhľad deformácie demodulovaného signálu pri nosnej frekvencii 100 kHz.</i>	32

Obsah

1	Úvod	1
2	Prehľad a význam modulácií v telekomunikačných sieťach	2
	2.1 Analógové modulácie s nosnými vlnami.....	2
	2.2 Digitálne modulácie s nosnými vlnami	2
	2.3 Diskrétné nekódované modulácie v základnom pásme	3
	2.4 Diskrétné kódované modulácie v základnom pásme	3
	2.5 Význam modulácií.....	3
3	Popis analógových modulácií.....	5
	3.1 Základné princípy analógových modulácií.....	5
4	Amplitúdové modulácie	6
	4.1 Amplitúdová modulácia s postrannými pásmami.....	6
	4.2 Kvadratúrna modulácia QAM	8
	4.3 Využitie v telekomunikáciách	8
5	Frekvenčná modulácia a fázová modulácia.....	10
	5.1 Podstata uhlových modulácií FM a PM.....	10
	5.2 Frekvenčná modulácia FM	11
	5.3 Využitie Frekvenčnej modulácie v telekomunikáciách.....	12
	5.3.1 Mobilné siete nulte generácie	12
	5.3.2 Mobilné siete prvej generácie.....	13
	5.3.3 Citizen band CB (Občianske pásmo).....	14
	5.4 Fázová modulácia PM	14
6	Realizácia modulácií	16
	6.1 Amplitúdová modulácia	16
	6.2 Kvadratúrna amplitúdová modulácia.....	18
	6.3 Frekvenčná modulácia.....	21
7	Demodulátory frekvenčnej modulácie	23
	7.1 Zero crossing (ZX) demodulátor frekvenčnej modulácie.....	23
	7.1.1 Meranie zmeny amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na šírke pulzu pri nosnej frekvencii 10 kHz.....	24
	7.1.2 Meranie zmeny amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na šírke pulzu pri nosnej frekvencii 100 kHz.....	25
	7.1.3 Meranie zmeny amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na zmene amplitúdy modulačného signálu ZX demodulátora pri nosnej frekvencii 10 kHz	27

7.1.4	Meranie zmeny amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na zmene amplitúdy modulačného signálu ZX demodulátora pri nosnej frekvencii 100 kHz	28
7.2	Phase Locked Loop (PLL) demodulátor frekvenčnej modulácie	29
7.2.1	Meranie zmeny amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na zmene amplitúdy modulačného signálu PLL demodulátora pri nosnej frekvencii 10 kHz	30
7.2.2	Meranie zmeny amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na zmene amplitúdy modulačného signálu PLL demodulátora pri nosnej frekvencii 100 kHz	31
8	Záver.....	33
	Použitá literatúra	34
	Zoznam príloh	35

1 Úvod

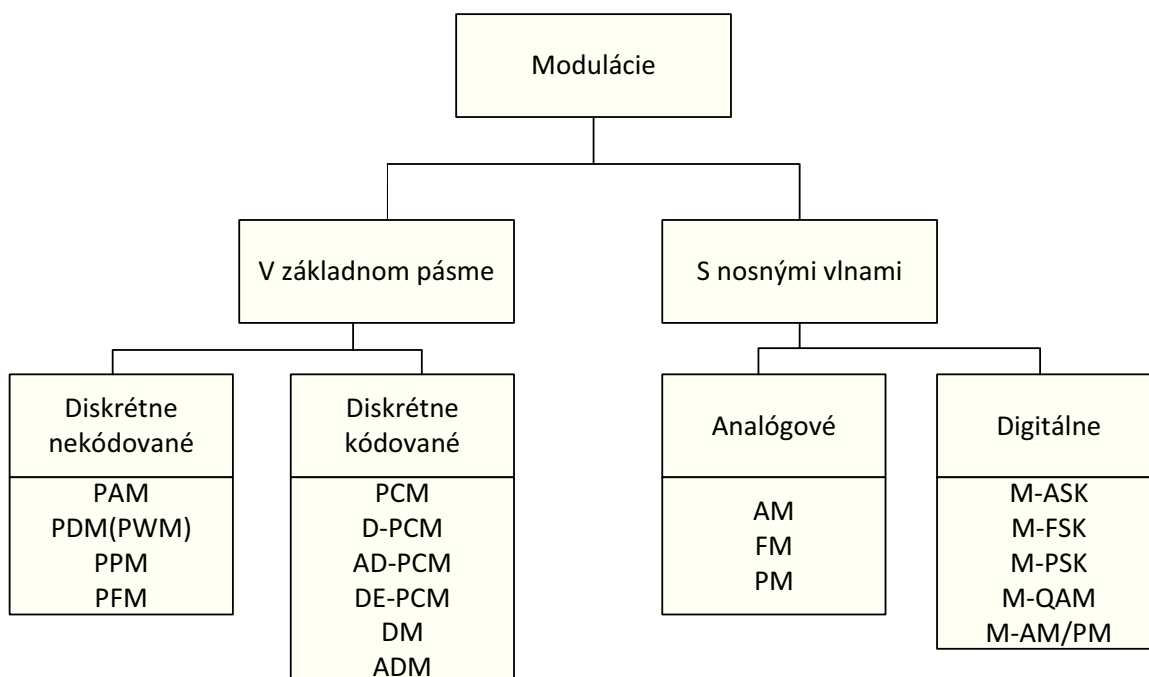
Analógové modulácie sú najstaršie modulácie, ktoré sa používali na prenos signálov a v minulosti sa využívali takmer vo všetkých oblastiach telekomunikácií. V dnešnej dobe sú ale postupne nahradzované digitálnymi moduláciami, aj keď v istých oblastiach ešte stále nájdu svoje uplatnenie. Táto bakalárska práca sa skladá z dvoch hlavných častí.

Prvá časť sa zaoberá základným rozdelením modulácií a ich významu v telekomunikáciách, teoretickým spracovaním základných typov analógových modulácií ako sú amplitúdová modulácia, frekvenčná modulácia a fázová modulácia a jednou zloženou moduláciou a to je kvadrátúrna amplitúdová modulácia. K všetkým týmto moduláciám sú uvedené aj oblasti v telekomunikáciách a technológie kde sa využívali v minulosti alebo sa využívajú ešte aj dnes. Následne je spracovaná realizácia amplitúdovej modulácie, frekvenčnej modulácie a kvadrátúrne amplitúdovej modulácie formou návodu na výukovom systéme TIMS.

Cieľom tejto bakalárskej práce je podrobnej analýzy vybranej analógovej modulácie formou návodov a protokolov, čomu sa venuje druhá časť tejto práce. Vybral som si meranie vlastností Zero crossing demodulátora a Phase locked loop demodulátora frekvenčnej modulácie. Konkrétne je spracovaná závislosť veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu k veľkosti amplitúdy modulačného signálu pri oboch typoch demodulátorov pri nosnej frekvencii 10 kHz a 100 kHz a ich porovnanie. Druhé meranie spracováva závislosť veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu na šírke impulzu využívaného pri demodulácii v Zero crossing demodulátore pri nosných frekvenciách 10 kHz a 100 kHz, ich porovnanie a vyhodnotenie.

2 Prehľad a význam modulácií v telekomunikačných sieťach

V rádiovkej komunikácii sa v súčasnosti používa väčší počet rôznych typov modulácií. Ich základná klasifikácia podľa obr. 2.1 rozlišuje modulácie v základnom pásme a modulácie s nosnými vlnami. Najstaršie modulácie s nosnými vlnami boli analógové, neskôr vznikli modulácie digitálne. V oblasti modulácií v základnom pásme boli nekódované, za nimi potom nasledovali modulácie kódované.



Obrázok 2.1 Prehľad základných modulačných spôsobov používaných v rádiovkej komunikácii

2.1 Analógové modulácie s nosnými vlnami

Uvažované analógové modulácie vznikajú tak, že sa pomocou analógového modulačného signálu spojitého v čase i v amplitúde moduluje analógová sinusová vysokofrekvenčná alebo mikrovlnná nosná vlna. Moduláciou sa pritom rozumie ovplyvňovanie jedného z parametrov nosnej vlny modulačným signálom. Ak je to amplitúda, tak vzniká *amplitúdová modulácia AM*, pri ovplyvnení frekvencie sa vytvára *frekvenčná modulácia FM* a pri ovplyvňovaní fázy vzniká *fázová modulácia PM*. [1]

2.2 Digitálne modulácie s nosnými vlnami

Tieto modulácie vznikajú tak, že sa vysokofrekvenčná alebo mikrovlnná sinusová nosná vlna moduluje signálom niektorej diskkrétnej modulácie v základnom pásme. Jedná sa teda o dvojnásobnú moduláciu, lebo modulačným signálom je už predtým modulovaný signál. Ako modulačný signál sa väčšinou uplatňuje binárny signál PCM alebo jeho niektoré modifikácie, ostatné diskkrétne modulácie sa k danému účelu používajú len zriedka. Binárnym modulačným signálom je možné modulovať

amplitúdu, frekvenciu alebo fázu nosnej vlny. Pri dvojstavových moduláciách sa modulovaný parameter tejto vlny mení iba medzi dvoma diskretnými stavmi, z ktorých jeden odpovedá modulačnému bitu 0 a druhý bitu 1. Ak je modulovaným parametrom amplitúda nosnej vlny, získa sa dvojstavová modulácia PCM/AM, resp. dvojstavové kľúčovanie amplitúdovým posunom 2ASK. Podobne pri kľúčovaní frekvencie sa vytvára dvojstavová modulácia PCM/FM, resp. dvojstavové kľúčovanie frekvenčným posunom 2FSK. Pri kľúčovaní fázy vzniká dvojstavová modulácia PCM/PM, resp. dvojstavové kľúčovanie fázovým posunom 2PSK, pre tento formát sa ale najčastejšie používa formát BPSK. Vývojovo mladšou kategóriou digitálnych modulácií predstavujú M-stavové modulácie so súčasným kľúčovaním amplitúdy a fázy nosnej vlny značené M-ASK/PSK. Ich novšie varianty sú M-stavové kvadratúrne amplitúdové modulácie M-QAM. [1]

2.3 Diskrétné nekódované modulácie v základnom pásme

Základným typom tejto kategórie je diskretná pulzná amplitúdová modulácia (PAM). Tá vzniká vo svojej najjednoduchšej podobe tak, že sa analógový modulačný signál privádza na kľúčovaný spínač, ktorý je spínaný sledom pravouhlých impulzov. Za spínačom sa potom objavuje signál PAM a to v podobe sekvencie v čase nespojitých impulzov, ktorých amplitúdy kopírujú priebeh analógového modulačného signálu. Spomenutý sled vzorkovacích impulzov má konštantnú amplitúdu, frekvenciu a šírku, a preto sa tiež nazýva nemodulovaná impulzová nosná vlna. Moduláciu PAM je potom možné považovať za amplitúdovú moduláciu tejto nosnej vlny analógovým modulačným signálom. Okrem zmien amplitúdy sa pri impulzovej nosnej vlne môže meniť tiež šírka jej impulzov, čím vzniká diskretná šírková modulácia PDM, resp. PWM. Pri ovplyvňovaní polohy impulzov nosnej vlny voči polohe nominálnej sa vytvára diskretná polohová modulácia PPM a pri ovplyvňovaní frekvencie vzniká diskretná frekvenčná modulácia PFM. [1]

2.4 Diskrétné kódované modulácie v základnom pásme

Najrozšírenejším typom z tejto kategórie je impulzová kódovaná modulácia PCM. Tá sa vytvára tak, že sa analógový modulačný signál najskôr premení na signál PAM, ktorý sa potom kvantuje. Pritom sa celý jeho dynamický rozsah rozdelí na konečný počet kvantizačných úrovní a každej skutočnej úrovni impulzu PAM sa priradí najbližšia kvantizačná úroveň. Kvantovaný signál sa ďalej kóduje, to je prevod jeho skutočnej veľkosti (vyjadrený obvykle v desiatkovej sústave) do sústavy binárnej. Tým sa vytvorí signál s moduláciou PCM. Pri diferenčnej modulácii DPCM sa nekóduje skutočná veľkosť kvantovaných vzorkov, ale iba rozdiel medzi skutočnou veľkosťou a predikovanou veľkosťou z niekoľkých predchádzajúcich kvantovaných vzorkov. V prípade diferenciálne kódovanej modulácie PCM (DE PCM) sa najskôr vytvorí PCM signál. Z neho sa potom pomocou vhodného algoritmu získa signál DE PCM, v ktorom je informácia obsiahnutá v rozdieli jedného bitu oproti predchádzajúcemu bitu. Modulácia Delta DM v podstate predstavuje jednobitovú variantu PCM. Ak je n -tý vzorok analógového modulačného signálu väčší ako predchádzajúci, je v signále DM bit 1 a ak je menší, tak je v signále DM bit 0. Všetky spomenuté varianty diskretných kódovaných modulácií precujú s konštantným kvantizačným krokom. Pri adaptívnej modulácii DM (ADM) a tiež pri adaptívnej modulácii DPCM (ADPCM) sa kvantizačný krok mení v závislosti na priebehu analógového modulačného signálu. [1]

2.5 Význam modulácii

V telekomunikáciách je modulácia proces odovzdávania správy, napríklad digitálneho bitového toku alebo analógového zvukového signálu do iného signálu, ktorý môže byť fyzicky odovzdaný. Cieľom modulácie je preniesť modulačný signál zo základného pásma do preloženého

pásma o rozdielnej frekvencii, ktorá je ale výhodnejšia na prenos, napríklad nízkofrekvenčný zvuk signálu do rádiovfrekvenčného signálu. V komunikáciách, napríklad v káblovej TV alebo systémoch verejnej telefónnej siete môžu byť elektrické signály posielané iba na limitovanej frekvencii postranného pásma so špecifickou (nenulovou) hornou a dolnou medznou frekvenciou. Modulácia sínusovej nosnej vlny umožňuje udržať frekvenčný rozsah prenášaného signálu čo najbližšie k stredovej frekvencii v postrannom pásme.

3 Popis analógových modulácií

Vývojovo najstaršie systémy pre pozemnú rádiovú komunikáciu používali pre prenos analógovú amplitúdovú moduláciu (AM), ku ktorej sa neskôr pripojila analógová frekvenčná modulácia (FM) a analógová fázová modulácia (PM). Modulácia AM a jej varianty sa v súčasnej dobe uplatňujú už len pri starších a jednoduchších systémoch ako je napríklad rozhlas AM. Oproti tomu modulácia FM ešte stále nachádza využitie aj v náročnejších aplikáciách, medzi ktoré patrí stereofónny rozhlas FM, systémy analógovej družicovej televízie a pod. Analógovým moduláciám je dnes venovaná len obmedzená pozornosť, pretože vo väčšine oblastí rádiovkej komunikácie sú rýchlo nahradzované moduláciami digitálnymi. [1]

3.1 Základné princípy analógových modulácií

Pri analógových moduláciách sa všeobecným modulačným signálom $m(t)$ moduluje vhodný prameter spojitkej harmonickej (obvykle kosinusovej) vysokofrekvenčnej nosnej vlny $u_c(t) = U_c \cos(2\pi f_c t)$. Modulačný signál môže mať charakter napätia alebo prúdu, ďalej však väčšinou predpokladáme, že je to signál napäťový. Akákoľvek analógová modulácia sa dá vyjadriť vzťahom

$$y(t) = a(t) \cdot \cos[\omega_0 t + \varphi(t)] \quad (3.1)$$

kde:

$a(t)$ - amplitúda modulovaného signálu

$\omega_0(t)$ - uhlová frekvencia

$\varphi(t)$ - počiatočná fáza

Ak sa mení okamžitá amplitúda napätia modulovanej nosnej vlny lineárne s modulačným napätím $m(t)$, pričom jej relatívna fáza voči fáze nemodulovanej nosnej vlny zostáva konštantná, získava sa tým amplitúdová modulácia. Tá náleží do kategórie *lineárnych modulácií* u ktorých sú vo frekvenčnom spektre modulovaného signálu obsiahnuté len frekvenčné zložky, ktoré odpovedajú jednotlivým zložkám modulačného signálu.

Pokiaľ v ich frekvenčnom spektre sú nielen zložky odpovedajúce jednotlivým harmonickým modulačného signálu ale aj ich vzájomné intermodulačné produkty, jedná sa o *nelineárnu moduláciu*. Z týchto je najčastejšie využívaná *frekvenčná modulácia*, pri ktorej je okamžitá odchýlka uhlovej frekvencie modulovanej nosnej vlny, voči frekvencii nemodulovanej nosnej vlny, úmerná modulačnému signálu. K nelineárnym moduláciám ďalej patrí *fázová modulácia*, pri ktorej je okamžitá odchýlka fázy modulovanej nosnej vlny voči fáze nemodulovanej nosnej vlny úmerná modulačnému signálu.

4 Amplitúdové modulácie

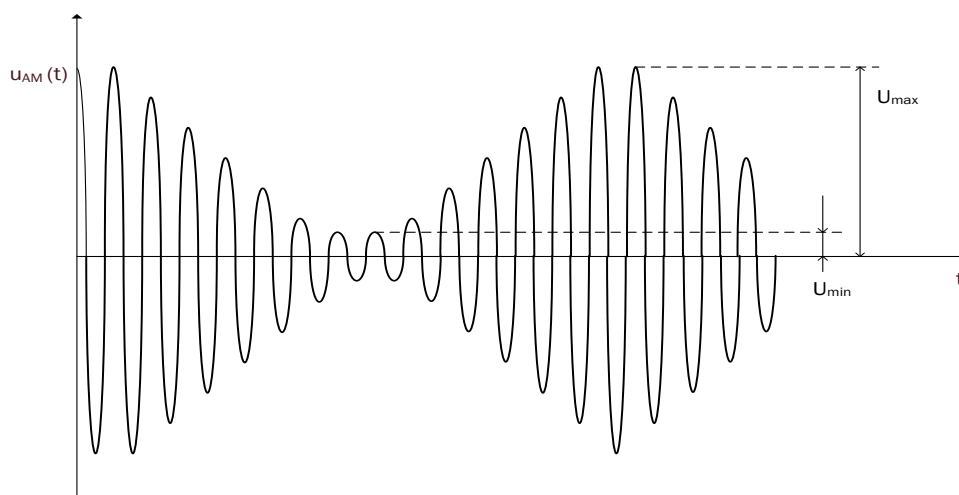
Historicky je to najstarší druh modulácie. Začala sa používať pri experimentoch s rádiovým vysielaním tesne po roku 1900.

4.1 Amplitúdová modulácia s postrannými pásmami

Základným typom amplitúdových modulácií je amplitúdová modulácia s oboma postrannými pásmami, ktoré nesú informáciu a nepotlačenou nosnou vlnou, značená symbolom AM. Jej podstata je naznačená na obr. 4.1. Mnohokrát sa ale niektoré z týchto zložiek odstraňujú a vznikajú modulácie s jedným postranným pásmom alebo s potlačenou alebo aspoň redukovanou nosnou vlnou. Amplitúdová modulácia AM je definovaná ako modulácia, pri ktorej sa okamžitá amplitúda modulovanej nosnej vlny mení okolo svojej strednej hodnoty U_c lineárne s modulačným signálom $m(t)$. Frekvencia ani fáza nosnej vlny sa u tejto modulácie nemení. Časový priebeh príslušného modulovaného napätia $u_{AM}(t)$, znázorneného na obr.4.1, je daný vzorcom (4.1)

$$u_{AM}(t) = [U_c + U_m \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_c t) = U_c [1 + m_a \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_c t) \quad (4.1)$$

Veličina $m_a = U_m/U_c$ je *činiteľ amplitúdovej modulácie*. Tento činiteľ sa často vyjadruje v percentách, pričom $m_a\% = m_a \cdot 100$; potom sa označuje ako *hlĺbka modulácie* alebo tiež percento modulácie. Ak nemá pri modulácii AM vzniknúť skreslenie, musí činiteľ modulácie spĺňať podmienku $0 \leq m_a \leq 1$, v opačnom prípade dochádza k premodulovaniu. Okrem toho musí byť frekvencia nosnej vlny f_c omnoho vyššia ako najvyššia modulačná frekvencia f_{mmax} , musí teda platiť nerovnosť $f_c \gg f_{mmax}$. Potom obálka modulovaného signálu výstižne sleduje modulačný priebeh a proces amplitúdovej modulácie prebieha bez skreslenia.



Obrázok 4.1 Časový priebeh signálu s AM pri harmonickom modulačnom signále

Časový priebeh modulovaného signálu AM určený vzťahom (4.1) sa pri modulácii jediným harmonickým signálom určí prevedením tu naznačeného násobenia; po úprave:

$$u_{AM}(t) = U_c \cos(2\pi f_c t) + \frac{m_a U_c}{2} [\cos 2\pi(f_c - f_m)t + \cos 2\pi(f_c + f_m)t] \quad (4.2)$$

Toto spektrum sa skladá zo samotnej nosnej vlny o amplitúde U_c a z dvoch postranných modulačných zložiek o amplitúdach $U_m/2 = m_a U_c/2$, ležiacich symetricky po oboch stranách nosnej vlny, vo vzdialenostiach $+f_m$ a $-f_m$ od nej. Pri maximálnom príípoštnom činiteľi modulácie ($m_a = 1$)

zaberá nosná vlna, ktorá nenesie informáciu, práve 2/3 celkového výkonu modulovaného signálu a obe postranné zložky, ktoré informáciu nesú, celkom len 1/3 tohto výkonu. Pri obvyklých, menších hĺbkach modulácie ($m_a \gg 1$) sa táto nevýhodná energetická bilancia AM modulácie ešte zhoršuje, čo je taktiež jej veľkou slabinou. Situácia sa dá ale zlepšiť použitím niektorej z odvodených amplitúdových modulácií.

Činiteľ amplitúdovej modulácie sa dá v praxi určiť z maximálnej amplitúdy U_{max} a minimálnej amplitúdy U_{min} modulovaného signálu alebo pomocou amplitúdy modulačného signálu U_m a amplitúdy nosnej vlny U_c , resp. Pomocou jednosmernej a striedavej zložky modulačného signálu a to pomocou vzťahu:

$$m_a = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}} = \frac{U_m}{U_c} = \frac{U_{DC}}{U_{AC}} \quad (4.3)$$

tak ako ukazuje pre prípad modulácie harmonickým signálom obr. 4.1.

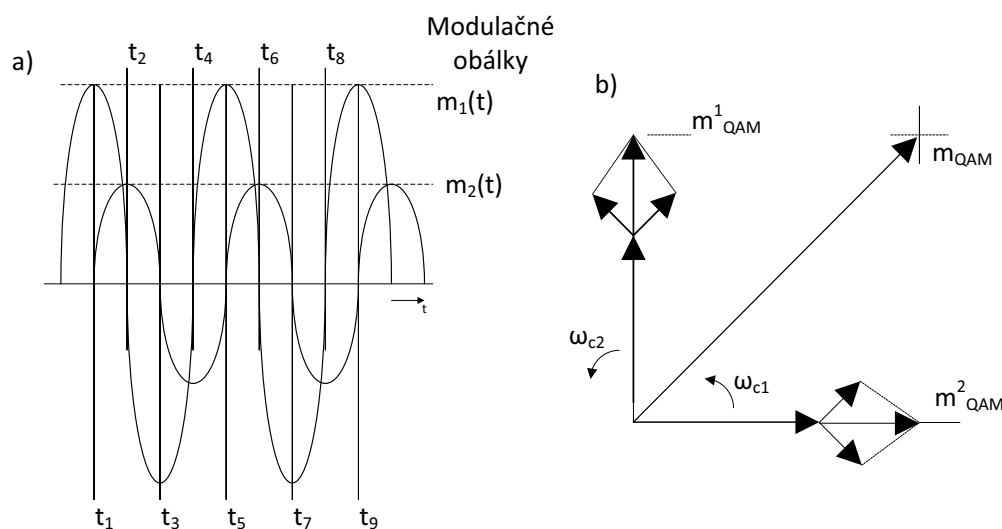
Ak má modulačný signál všeobecný nesínusový priebeh $m(t)$, je časový priebeh modulovaného napätia AM daný reláciou obdobnou vzťahu (4.1):

$$u_{AM}(t) = U_c[1 + k_{AM}m(t)]\cos(2\pi f_c t) \quad (4.4)$$

pričom k_{AM} je konštanta, nazývaná amplitúdová citlivosť modulátoru AM. Maximálna hodnota výrazu $k_{AM} m(t)$, násobená číslom 100 sa v tomto prípade všeobecného modulačného signálu opäť označuje ako percento modulácie. Ak nemá dochádzať k premodulovaniu, musí byť vždy splnená podmienka $|k_{AM}m(t)| < 1$. [1]

4.2 Kvadrátúrna modulácia QAM

Pri kvadrátúrnej amplitúdovej modulácii QAM sa používajú dve nosné vlny, ktoré majú presne rovnakú frekvenciu a obvykle i amplitúdu, avšak vzájomný fázový posuv 90° . Každá z nich je potom modulovaná samostatným modulačným signálom $m_1(t)$ a $m_2(t)$. Časový priebeh výsledného signálu QAM je na obr.4.2a. Na obr.4.2b je fázové znázornenie signálu QAM, z ktorého vyplýva, že na tento signál je možné pozeráť buď ako na dve samostatné amplitúdovo modulované nosné vlny nachádzajúce sa v kvadratúre, alebo ako na jedinú nosnú vlnu so súčasnou moduláciou amplitúdy aj fázy.



Obrázok 4.2 Modulácia QAM: a) Časový priebeh signálu QAM; b) Fázové znázornenie signálu QAM

V praxi sa často vyskytuje varianta modulácie QAM, kde sú obe nosné vlny úplne potlačené a prenášajú sa iba ich postranné modulačné pásma, čím vzniká kombinovaný modulačný spôsob QAM/DSB. Ten sa uplatňuje v sústavách farebnej televízie NTSC a PAL a to pri prenose rozdielových farbonosných zložiek (R-Y) a (B-Y). Signál uvažovaného typu sa dá vyjadriť vzťahom:

$$u_{QAM}(t) = U_c \cos(2\pi f_c t) m_1(t) - U_c \sin(2\pi f_c t) m_2(t) \quad (4.5)$$

Ak nemá dochádzať pri modulácii QAM k prarazitnému prenikaniu modulačného signálu z jedného kanála do druhého, musí byť u referenčných nosných vln v modulátoroch i nemonulátoroch čo najpresnejšie dodržaný vzájomný fázový posuv 90° . V prípade modulácie QAM/DSB musí byť okrem toho dosiahnutá aj dokonalá frekvenčná a fázová koherencia regenerovaných referenčných nosných vln v demodulátore s príslušnými nosnými vlnami v modulátore. [1]

4.3 Využitie v telekomunikáciách

Amplitúdovú moduláciu použil už Alexander Graham Bell v roku 1876 pri svojom elektromagnetickom telefóne. Vtedy ju nazval „zvlnený prúd“. Od konca 20-tého storočia sa začali v telefónoch používať digitálne prvky ale prechod všetkých zariadení na tónovú voľbu sa musí robiť postupne, preto sú nové digitálne telefónne prístroje stále kompatibilné so staršími telefónnymi ústredňami s amplitúdovou moduláciou.

Airband alebo Aircraft band (Letecké rozhlasové pásmo) je skupina frekvencií v pásme VKV vymedzené pre rádiovú komunikáciu civilných lietadiel. Rôzne úseky pásma sa používajú riadení

letovej prevádzky a rádionavigácii. Pásmo, ktoré využíva je rozdelené medzi frekvencie od 108 MHz do 137 MHz. Najnižších 10 MHz (108 MHz – 117,95 MHz) je rozdelené na 200 úzkopásmových kanálov po 50 kHz. Tieto kanály sú rezervované na navigáciu, ako napríklad VOR rádiomajáky a systémy pre presné priblíženie ako sú ILS lokalizátory.

Rozteč kanálov pre hovorovú komunikáciu bola až do roku 1947 200 kHz pri 70 kanáloch od 118 kHz do 132 kHz. Od roku 1947 do 1958 bola rozteč 100 kHz. V roku 1954 sa rozdelil znovu na 50 kHz a zvýšila sa šírka pásma na 135,95 MHz (360 kanálov) a potom na 25 kHz v roku 1972 umožňoval 720 použiteľných kanálov. V januári 1990 sa pridali frekvencie medzi 136 MHz a 136,975 MHz a zvýšil sa počet kanálov na 760.

Letové komunikácie celosvetovo používajú amplitúdovú moduláciu, prevažne s dvoma postrannými pásmami a plnou nosnou na VKV a UKV a s jedným postranným pásmom a potlačenou nosnou na KV. Okrem jednoduchosti, energetickej efektívnosti a kompatibility so staršími zariadeniami umožňujú AM a SSB silnejšie stanice na prevládanie slabších alebo zasahujúcich staníc a nedovoľujú tzv. Capture effect známy z FM. Aj keď pilot vysiela, tak kontrolná veža môže „hovoriť“ cez toto vysielenie a ostatné lietadlá budú počuť trochu skomolený mix oboch vysielení. Je to lepšie ako keby mali počuť len jedno alebo druhé. Aj keď oba vysielenia sú prijaté s identickou silou signálu, tak heterodýn (lokálny oscilátor) bude počutý aj keď v FM systéme by nebola indikovaná žiadna blokácia. [2]

5 Frekvenčná modulácia a fázová modulácia

Vývojovo mladšími ale z niektorých hľadísk podstatne výhodnejšími modulačnými spôsobmi, v porovnaní s amplitúdovou moduláciou sú *frekvenčná modulácia* FM a *fázová modulácia* PM. Obe tieto modulačné formáty náležia do kategórie uhlových (exponenciálnych) modulácií pretože sa u nich modulačným signálom ovplyvňuje fázový uhol nosnej vlny. Pritom amplitúda modulovanej nosnej vlny ostáva konštantná. Vzhľadom k vzájomnej príbuznosti je uvedený najskôr spoločný matematický popis oboch týchto variant uhlových modulácií. [1]

5.1 Podstata uhlových modulácií FM a PM

Signál s ľubovoľnou uhlovou moduláciou je možné vyjadriť vzťahom

$$u_m(t) = U_c \cos [\theta_i(t)] \quad (5.1)$$

kde $\theta_i(t)$ je okamžitá fáza (fázový uhol) modulovanej nosnej vlny a U_c je konštantná amplitúda nosnej vlny. Pomocou okamžitej fázy sa môže vyjadríť tiež okamžitá uhlová frekvencia $\omega_i(t)$, ktorá je definovaná ako derivácia fázy podľa času

$$\omega_i(t) = \frac{d\theta_i(t)}{dt} \quad (5.2)$$

respektíve okamžitá frekvencia $f_i(t)$ modulovanej nosnej vlny.

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\theta_i(t)}{dt} \quad (5.3)$$

Zmeny okamžitej fázy v závislosti na modulačnom signále sa môžu uskutočňovať rôznymi spôsobmi. Z hľadiska možnosti pomerne jednoduchšej realizácie sú však v praxi používané iba dve varianty, označované ako frekvenčná modulácia FM a fázová modulácia PM, definované nasledovne:

Frekvenčná modulácia FM je varianta uhlovej modulácie, pri ktorej je okamžitá frekvencia $f_i(t)$ modulovaného signálu rovná súčtu konštantnej frekvencie f_c nemodulovanej nosnej vlny a časovo premennej zložky, priamo úmernej modulačnému napätiu $m(t)$, teda:

$$f_i(t) = f_c + k_{FM}m(t) \quad (5.4)$$

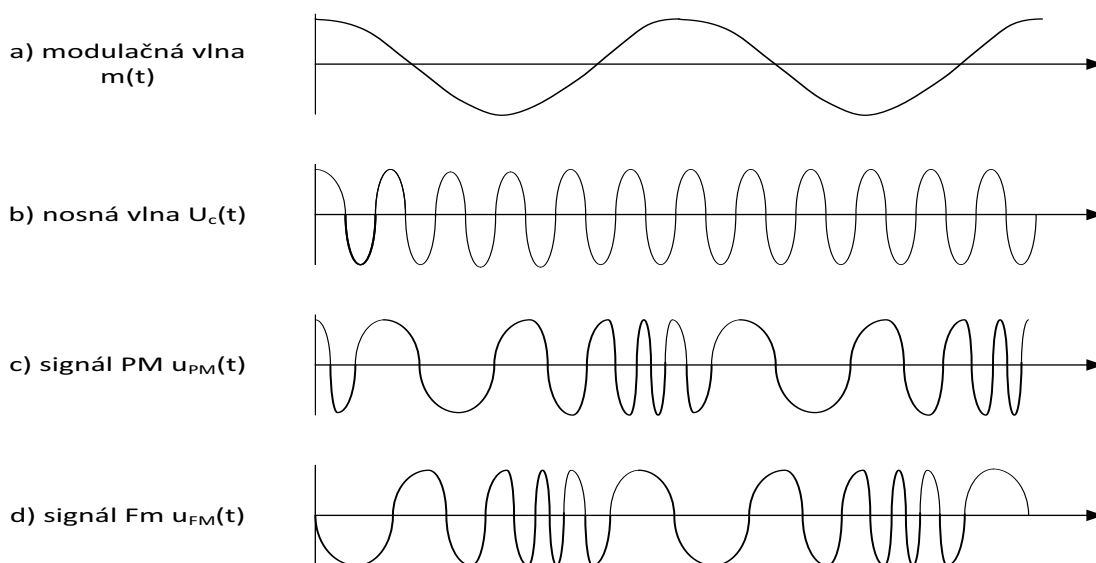
Fázová modulácia PM je varianta uhlovej modulácie pri ktorej je okamžitý fázový uhol $\theta_i(t)$ modulovaného signálu rovný súčtu fázového uhla $2\pi f_c t$ nemodulovanej nosnej vlny a časovo premennej zložky $\varphi(t)$, priamo úmernej modulačnému napätiu $m(t)$, teda:

$$\varphi_i(t) = 2\pi f_c t + \varphi(t) = 2\pi f_c t + k_{PM}m(t) \quad (5.5)$$

Fázovo modulovaný signál je potom daný v časovej oblasti reláciou

$$u_{PM}(t) = U_c \cos [2\pi f_c t + k_{PM}m(t)] \quad (5.6)$$

Na obr.5.1a je znázornený priebeh modulačného signálu $m(t)$, ktorý je pre zjednodušenie uvažovaný ako harmonický. Na obr.5.1b je časový priebeh harmonickej nosnej vlny $u_c(t)$. Na obr. 5.1c je zobrazený odpovedajúci frekvenčne modulovaný signál $u_{FM}(t)$ a na obr. 5.1d fázovo modulovaný signál $u_{PM}(t)$. Je zrejmé, že časové priebehy modulovaných signálov FM a PM sú pri sinusovej modulácii prakticky rovnaké a vzájomne sa líšia iba časovým posunom, odpovedajúcim štvrtine periódy modulačného harmonického signálu. Obvyčajným zobrazením týchto modulovaných signálov na osciloskope sa teda nedá zistiť o ktorú moduláciu sa jedná. Pre ich jednoznačnú identifikáciu je ju nutné porovnať s modulačným priebehom. [1]



Obrázok 5.1 Časové priebehy signulov využívaných v uhlových moduláciách: a) harmonický modulačný signál $m(t)=U_m \cos(2\pi f_m t)$; b) harmonická nosná vlna $u_c(t)=U_c \cos(2\pi f_c t)$; c) FM signál; d) PM signál

5.2 Frekvenčná modulácia FM

K dôkladnejšiemu popisu frekvenčnej modulácie je vhodné uviesť zvláštny prípad, kedy je modulačný signál harmonický, pričom je daný vzťahom:

$$m(t) = U_m \cos(2\pi f_m t) \quad (5.7)$$

Jeho dosadením do (5.4) sa určí okamžitá frekvencia signálu FM

$$f_i(t) = f_c + k_{FM} U_m \cos(2\pi f_m t) = f_c + \Delta f \cos(2\pi f_m t) \quad (5.8)$$

kde parameter $\Delta f = k_{FM} U_m$ je frekvenčná deviácia signálu FM. Tá odpovedá maximálnej odchýlke okamžitej frekvencie modulovanej vlny od kľudovej frekvencie nosnej vlny f_c , pri danej amplitúde U_m modulačného signálu. Deviácia Δf je priamo úmerná tejto amplitúde, avšak nezávisí na modulačnej frekvencii f_m .

Okamžitá fáza signálu FM je daná vzťahom:

$$\theta_i(t) = 2\pi \int_0^t f_i(t) dt = 2\pi f_c t + \frac{\Delta f}{f_m} \sin(2\pi f_m t) = 2\pi f_c t + \beta_{FM} \sin(2\pi f_m t) \quad (5.9)$$

Veličina $\beta_{FM} = \Delta f / f_m$ je pomer deviácie k modulačnej frekvencii a označuje sa ako *index frekvenčnej modulácie*. Je to fázová deviácia signálu FM, tj. maximálna odchýlka okamžitej fázy $\Theta_i(t)$ modulovaného signálu od fázy nemodulovanej nosnej vlny $2\pi f_c t$. Dosadením (5.9) do (5.1) je potom možné vyjadriť časový priebeh signálu s frekvenčnou moduláciou pri harmonickej (kosínusovej) modulácii

$$u_{FM}(t) = U_c \cos [2\pi f_c t + \beta \sin (2\pi f_m t)] \quad (5.10)$$

Na rozdiel od činiteľa amplitúdovej modulácie m_a , ktorého veľkosť nemá pri požiadavke neskresleného prenosu presahovať hodnotu jedna, veľkosť indexu frekvenčnej modulácie β nie je nijako obmedzená. V prexi je však užitočné rozlišovať z tohto hľadiska dve varianty frekvenčnej modulácie:

Indexom $\beta_{FM} < 1$ je charakterizovaná úzkopásmová modulácia FM. Tá sa svojimi niektorými vlastnosťami, hlavne požiadavkami na šírku pásma rádiového kanálu a šumovými parametrami podoba AM modulácii. Využíva sa napríklad pri mobilných vysielateľoch s vlnovou dĺžkou menšou ako 10 metrov.

Indexom $\beta_{FM} > 1$ je charakterizovaná širokopásmová modulácia FM. Pri tejto modulácii sa s rastúcim indexom β zväčšujú aj nároky na potrebnú šírku pásma, ktoré je potom väčšie než u AM modulácie. Súčasne s tým sa však po demodulácii na prijímacej strane zväčšuje pomer signál/šum. Uvažovaná modulácia teda mení šírku pásma za zlepšenia šumových vlastností, čo je v rade aplikácii veľmi užitočné.

Index frekvenčnej modulácie β_{FM} charakterizuje signál FM pri sínusovej modulácii. Ďalším dôležitým parametrom signálu FM, vhodným pre všeobecnejší prípad nesínusovej modulácie $m(t)$, je *deviačný pomer* D . Ten je definovaný ako pomer maximálnej odchýlky, tj. maximálneho frekvenčného zdvihu Δf_{max} dosahovaného pri maximálnej možnej amplitúde modulačného signálu $m(t)$ k maximálnej modulačnej frekvencii f_{mmax} obsiahnutej v nesínusovom modulačnom signále $m(t)$, teda

$$D = \frac{\Delta f_{max}}{f_{mmax}} \quad (5.11)$$

Frekvencia f_{mmax} je totožná so šírkou pásma B_m nesínusového modulačného signálu. Na rozdiel od indexu frekvenčnej modulácie β_{FM} , ktorého veľkosť závisí na okamžitých parametroch modulačného signálu (U_m, f_m), je deviačný pomer D pre daný FM systém konštantou. [1]

5.3 Využitie Frekvenčnej modulácie v telekomunikáciách

Frekvenčná modulácia sa využívala pri mobilných sieťach nulte a prvej generácie. Mobilné siete druhej generácie prešli na digitálnu moduláciu a siete prvej generácie sa už takmer nevyužívajú

5.3.1 Mobilné siete nulte generácie

OLT (Offentlig Landmobil Telefoni-Verejný pozemný mobilný telefón) fungujúci v rokoch 1966-1990 v Nórsku a využíval 160 MHz VHF pásmo s využitím frekvenčnej modulácie. Používal 160-162 MHz pre mobilné zariadenie a 168-170 MHz pre základňovú stanicu. Väčšina mobilných setov bola semi-duplex ale niektoré drahé boli full duplex. Každé zariadenie malo päťciferné číslo.

ARP (Autoradiopuhelin – Rádiatelefón do auta) bola Fínska komerčná mobilná sieť fungujúca v rokoch 1968-2000. Pracovala na 150 MHz frekvencii (80 kanálov na 147,9-154,875 MHz). Využívala spočiatku half-duplex, neskôr sa začal používať full duplex.

MTA (Mobiltelefonisystem A – Mobilný telefónny systém A) bol používaný v rokoch 1956 – 1967. Využíval pásmo 160 MHz a bol dostupný v Štokholme a Göteborgu s celkovo 125 užívateľmi.

MTB (Mobiltelefonisystem B) fungujúci v rokoch 1962 – 1983 už využíval tranzistorové mobilné zariadenia. Používal pásma 76-77,5 MHz a 81-82,5 MHz, bol dostupný aj v treťom najväčšom švédskom meste Malmö a mal okolo 600 užívateľov.

MTD (Mobiltelefonisystem – Mobilný telefónny systém) bol manuálny mobilný systém používaný vo Švédsku a Dánsku v rokoch 1971 – 1987. Využíval pásmo 450 MHz. Na svojom vrchole mal 20 000 užívateľov a 700 zamestnancov ako telefónnych operátorov.

MTS (Mobile Telephone Service) je VHF rádiový systém, ktorý je prepojený na Verejnú telefónnu sieť. Vyvinula ho firma Bell System a prvýkrát bol použitý v St. Louis v roku 1946. Systém sa používal do osemdesiatych rokov dvadsiateho storočia vo veľkých oblastiach Severnej Ameriky. Využíval frekvenčné pásmo od 152,48 MHz do 152,840 MHz na príjem a pásmo od 157,74 do 158,999 na vysielanie.

AMR (Automatizovaný Mestský Rádiatelefón) je mobilná sieť vyvinutá v socialistickom Československu a bola to prvá mobilná sieť v rámci východného bloku. Vývoj začal v polovici 70. rokov minulého storočia a bola určená pre účely správy pôšt a telekomunikácií. Aj keď sa jednalo o jednu sieť, v istej dobe existovali tri takéto siete. Experimentálna precujúca vo frekvenčnom pásme 162 MHz až 167 MHz, celorepubliková (161 MHz až 165 MHz) a oblastná (152 MHz až 157 MHz). Kvôli pomerom v socialistickom Československu, kedy bolo nemysliteľné aby niekto nepovolalý vlastnil rádiodanicu prebiehala prevádzka úplne na analógovej báze a signál nebol nijako šifrovaný, čo umožňovalo odposluch. Z toho istého dôvodu sieť nepodporovala žiadny spôsob autentizácie účastníka. [4]

5.3.2 Mobilné siete prvej generácie

AMPS (Advanced Mobile Phone System) je analógový systém pre mobilné telefóny vytvorený v Bellových laboratóriách a predstavený v roku 1978 v USA a používaný aj v Kanade, Španielsku, Novom Zélande, Austrálii, Srí Lanke a Izraeli. Bol full duplex, využíval pásmo 850 MHz a spočiatku obsahoval 666 kanálov. Koncom osemdesiatych rokov ale počet užívateľov v Spojených štátoch prekročil milión a tak sa zvýšil počet kanálov na 832. Každý duplexný kanál pozostával z dvoch frekvencií. 416 z nich bolo v rozmedzí 824 MHz až 849 MHz pre vysielanie z mobilného prístroja do základňovej stanice a 416 v rozmedzí 869 MHz až 894 MHz na prenos zo základňovej stanice do mobilného prístroja. Každý kanál mal šírku pásma 60 kHz pre každý duplexný kanál.

TACS (Total Access Communication System) je najzastarejšia varianta AMPS, ktorá bola používaná v niektorých európskych krajinách (vrátane Veľkej Británie a Írska). Používalo sa aj v Japonsku pod názvom JTAC (Japan Total Access Communication) a v Hong Kongu. Využíval frekvenčné pásmo 890 MHz až 905 MHz pre vysielanie mobilného zariadenia a pásmo 935 MHz až 950 MHz pre vysielanie základňovej stanice. Využíval tak rovnaké frekvenčné pásma aké dnes využíva GSM. TACS vypli krajiny okolo roku 2001.

ETACS (Extended Total Access Communications System) rozšírená verzia TACS s väčším množstvom kanálov. Využíval frekvenčné pásmo 872 MHz až 905 MHz pre vysielanie mobilného zariadenia a frekvenčné pásmo 917 MHz až 950 MHz pre vysielanie základňovej stanice.

NMT (Nordiska MobilTelefoni-gruppen – Škandinávská Mobilná Telefónna sieť) bol prvý automatický mobilný systém. Do činnosti bol uvedený v roku 1981 v reakcii na vyťaženosť vtedajších sietí ARP vo Fínsku, MTD vo Švédsku a Dánsku a OLT v Nórsku. Založený bol na analógovej

technológii označovanej ako prvá generácia a v pásme 450 MHz (NMT-450). Pre zvýšenie kapacity začalo byť v niektorých krajinách používané aj pásmo 900 MHz (NMT-900). Sieť mala veľkú popularitu, okrem škandinávskych krajín bola spustená aj v pobaltských a stredoeurópskych krajinách vrátane Slovenska a Českej republiky (Eurotel). [3] [5]

5.3.3 Citizen band CB (Občianske pásmo)

Rádiostanice vysielajúce v občianskom pásme pracujú na frekvencii okolo 27 MHz, majú malý výkon a k ich používaniu netreba skladať rádioamatérske skúšky. Prevádzka na CB sa riadi podľa pravidiel uvedených vo Všeobecnom oprávnení. V Českej republike je možné využívať 80 kanálov, vysielat' na týchto frekvenciách je možné iba frekvenčnou moduláciou s maximálnym výkonom 4 W. [6]

5.4 Fázová modulácia PM

Signál s fázovou moduláciou PM je pri všeobecnom modulačnom signále vyjadrený vzťahom (5.6). Za predpokladu, že modulačný signál je sínusový, získa sa dosadením tejto relácie do vzťahu 5.6 signál PM vo tvare:

$$u_{PM}(t) = U_c \cos [2\pi f_c t + \beta_{PM} \sin (2\pi f_m t)] \quad (5.12)$$

Ten sa líši od vzťahu (5.10) pre signál FM s harmonickou kosínusovou moduláciou iba zámenou indexu frekvenčnej modulácie $\beta_{FM} = \Delta f / f_m = k_{FM} U_m / f_m$ za index fázovej modulácie $\beta_{PM} = k_{PM} U_m$. Táto totožnosť je dosiahnutá práve vďaka sínusovej modulácii predpokladanej v signále PM narozdiel od kosínusovej modulácie uvažovanej v relácii (5.10) pre signál FM. Pri frekvenčnej modulácii je index β závislý na deviácii Δf , resp. Na amplitúde modulačného napätia U_m i na modulačnú frekvenciu f_m , naproti tomu pri fázovej modulácii je index β_{PM} závislý len na napätí U_m . Vzhľadom na podobnosť časových signálov FM a PM (obr.5.1c,d), majú aj čiarové frekvenčné spektrá oboch typov modulácií rovnaký charakter, rozdielne je však ich ovplyvňovanie zmenami indexov modulácie. Pri zmenách modulačnej frekvencie f_m a konštantnej amplitúdy modulačného napätia U_m sa u modulácie PM mení iba odstup spektrálnych čiar, pričom ich amplitúda ostáva zachovaná. Pri modulácii FM sa pri zmenách f_m mení odstup i amplitúda spektrálnych čiar. Ak nemá pri demodulácii signálu PM dochádzať k fázovej neistote, musí index fázovej modulácie β_{PM} spĺňať podmienku $\beta_{PM} \leq \pi$; relatívne zmeny fázy modulačného signálu PM potom nevybočia z intervalu $\pm\pi$.

Fázová modulácia sa v praxi príliš nepoužíva. Jej nevýhodou je, že priama demoduláciu signálu PM sa dá realizovať iba ako koherentná, tj. za pomoci dokonalej referenčnej nosnej vlny, ktorá sa však v prijímači obtiažne získava. Nepriama modulácia PM je síce možná, technicky je však náročná. Ďalšou slabinou fázovej modulácie v porovnaní s frekvenčnou moduláciou sú aj trochu horšie šumové vlastnosti. Modulátory PM však môžu byť využívané k nepriamej generácii signálov FM. Základné vlastnosti modulácie FM a modulácie PM pri modulácii harmonickým signálom zhrňuje tab. 5.1. [1]

Tabuľka 5.1 Základné parametre frekvenčnej modulácie FM a fázovej modulácie PM

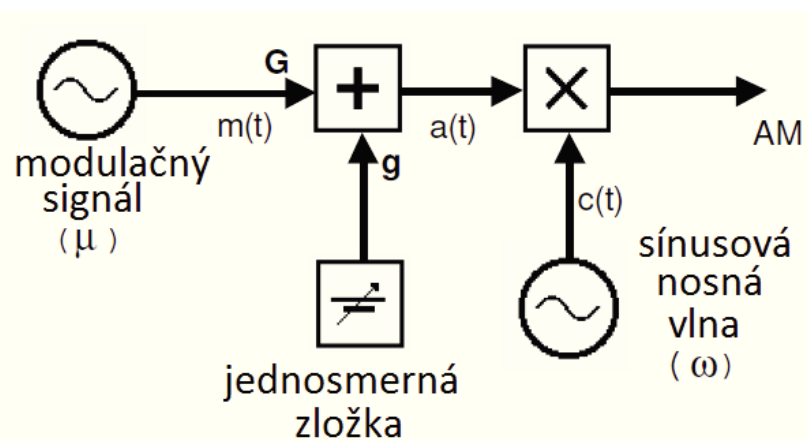
Modulácia	Frekvenčná odchýlka	Fázová odchýlka	Index
FM	Priamo úmerná napätiu U_m modulovaného signálu	Priamo úmerná napätiu U_m a nepriamo úmerná frekvencii f_m modulačného signálu	$\beta_{FM} = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{k_{FM} U_m}{f_m}$
PM	Priamo úmerná frekvencii f_m i napätiu U_m modulačného signálu	Priamo úmerná napätiu U_m modulačného signálu	$\beta_{PM} = k_{PM} U_m$
k_{FM} je frekvenčná citlivosť modulátoru FM; k_{PM} je fázová citlivosť modulátoru PM			

6 Realizácia modulácií

V tejto kapitole sú návody na skonštruovanie modulátorov vybraných analógových modulácií pomocou výukového programu TIMS. Na tieto návody budú naväzovať merania a protokoly v nasledujúcich kapitolách. Všetky veľkosti amplitúd signálov sú uvedené ako veľkosť amplitúdy od kladnej špičky po zápornú špičku. Popis jednotlivých modulov TIMS použitých v nasledujúcich meraniach je k dispozícii na priloženom CD.

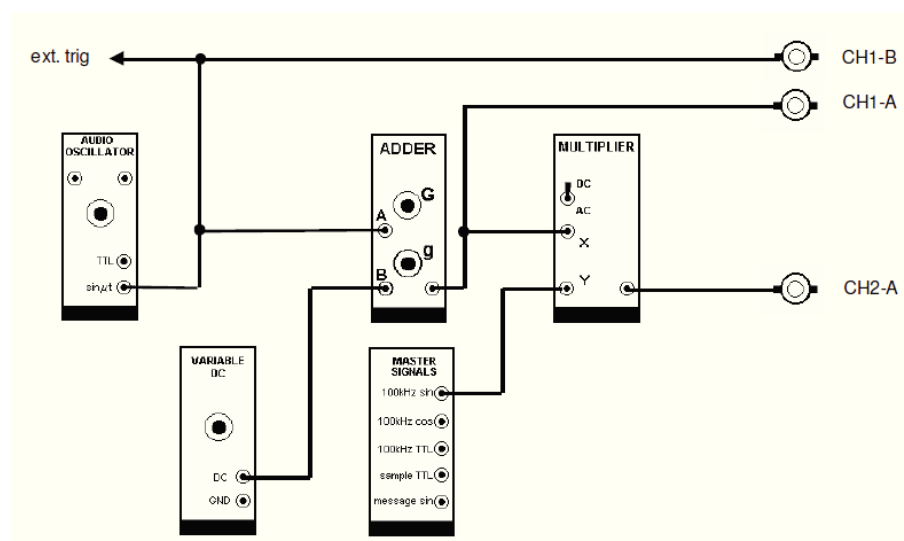
6.1 Amplitúdová modulácia

Na obr. 6.1 je znázornená bloková schéma modulátora AM modulácie. Najskôr sa spojí jednosmerná zložka s modulačným signálom v sčítači. Následne sa tento signál spojí s vysokofrekvenčným nosným signálom v modulátore. Výsledkom je amplitúdová modulácia s požadovanou hĺbkou modulácie.



Obrázok 6.1 Blokové schéma modulátora amplitúdovej modulácie

Zapojenie amplitúdovej modulácie spočíva v spočítaní nízko-frekvenčnej vlny a jednosmernej zložky v module ADDER a jej následnú moduláciu s vysokofrekvenčnou nosnou vlnou modulom MULTIPLIER.



Obrázok 6.2 Schéma zapojenia modulátora amplitúdovej modulácie

Amplitúdová modulácia sa skladá z nízko-frekvenčnej zložky a vysoko-frekvenčnej nosnej vlny. Može byť zapísaná ako

$$AM = A \cdot B = a(t)(1 + m \cdot \cos \omega_m t) \cdot U_c(\cos \omega_c t) \quad (6.1)$$

kde:

$a(t)$ -amplitúda modulačného signálu

U_c -amplitúda nosného signálu

m_a -činiteľ modulácie

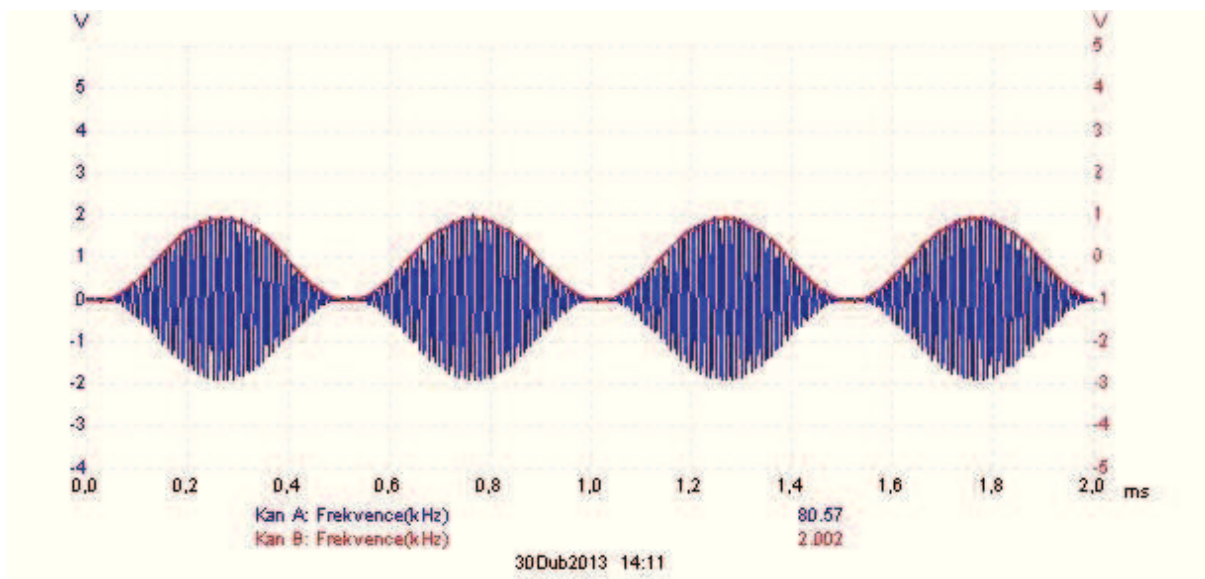
ω_m -uhlová frekvencia modulačného signálu

ω_c -uhlová frekvencia nosného signálu

Cieľom tejto úlohy je zapojiť moduly systému TIMS tak, aby na výstupe bola amplitúdová modulácia s oboma postrannými pásmami a nepotlačenou nosnou vlnou a s 100% hĺbkou modulácie.

Najskôr sa zapoja moduly podľa schémy na obr. 6.1. Výstupy X a Y na module MULTIPLIER sa ešte nezapájajú, kvôli nastaveniam modulu ADDER. Modul AUDIO OSCILLATOR sa nastaví na frekvenciu od 300 kHz do 3400 kHz. Modul SCOPE SELECTOR, ktorý umožňuje zapojenie koncoviek na oscilátore sa prepne na kanál CH1-B a upraví sa časová základňa osciloskopu tak, aby výstup z modulu AUDIO OSCILLATOR zobrazoval dve až tri periódy sínusovej modulačnej vlny. Na module AUDIO OSCILLATOR sa otočia potenciometre „g“ a „G“ úplne doľava, takže na výstupe modulu ADDER nebude ani jednosmerná ani striedavá zložka správy. Po prepnutí na kanál CH1-A sa zobrazí výstup modulu ADDER. Zosilňovač osciloskopu sa prepne aby reagoval na jednosmernú zložku signálu a citlivosť sa nastaví na 1 volt na dielik. Následne sa otočením potenciometru takmer úplne doľava na module VARIABLE DC zabezpečí výstupné napätie na úrovni okolo mínus 2 voltov. Modul VARIABLE DC má rozsah od -2,5 V do 2,5 V. Modul ADDER otočí polaritu napätia z výstupu modulu VARIABLE DC. Zatiaľ čo osciloskop stále zobrazuje výstup modulu ADDER, otáča sa potenciometer „g“ na module ADDER v smere hodinových ručičiek tak, aby sa upravila jednosmerná zložka signálu na výstupe modulu ADDER presne 1 V nad predošlou úrovňou signálu. Tá úroveň sa nazýva nulová referenčná úroveň. Otáčaním potenciometra „G“ na module ADDER sa začne zobrazovať sínusový signál, ktorý treba upraviť tak, aby najnižší bod signálu bol totožný s nulovou referenčnou úrovňou. Toto nastavenie zabezpečí 100% hĺbku modulácie výsledného modulovaného signálu. Sínusový signál je teraz vycentrovaný presne A voltov nad nulovou referenčnou úrovňou a jeho amplitúda je A. Teraz sa dosiahlo, že jednosmerná aj striedavá zložka signálu vystupujúceho z modulu ADDER má rovnakú amplitúdu a vymodelovala sa modulačná vlna: $A = a(t)(1 + m_a \cos \omega_m t)$ pričom $m_a = 1$.

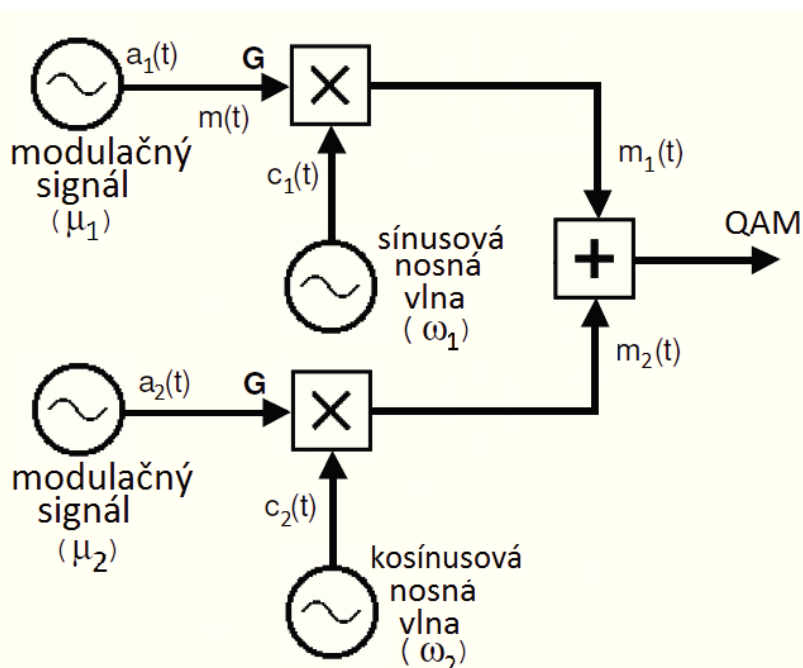
V tejto fáze sa môžu zapojiť aj vstupy X a Y modulu MULTIPLIER, ktorý musí byť prepnutý aby akceptoval jednosmernú zložku signálu. Na vstup X sa zapojí výstup modulu ADDER. Vysoko-frekvenčný nosný signál $B = U_c(\cos \omega_c t)$ sa pripraví zapojením 100 kHz nosného signálu na module MASTER SIGNALS na vstup Y modulu MULTIPLIER. Po zapojení výstupu modulu MULTIPLIER na CH2-A osciloskopu by sa mala zobrazovať amplitúdová modulácia s oboma postrannými pásmami a nepotlačenou nosnou vlnou so 100% hĺbkou modulácie. Pokiaľ by tak nebolo, je ju potrebné otáčaním potenciometrov „g“ a „G“ na module MULTIPLIER doladiť. [7]



Obrázok 6.3 Amplitúdová modulácia so 100% hĺbkou modulácie

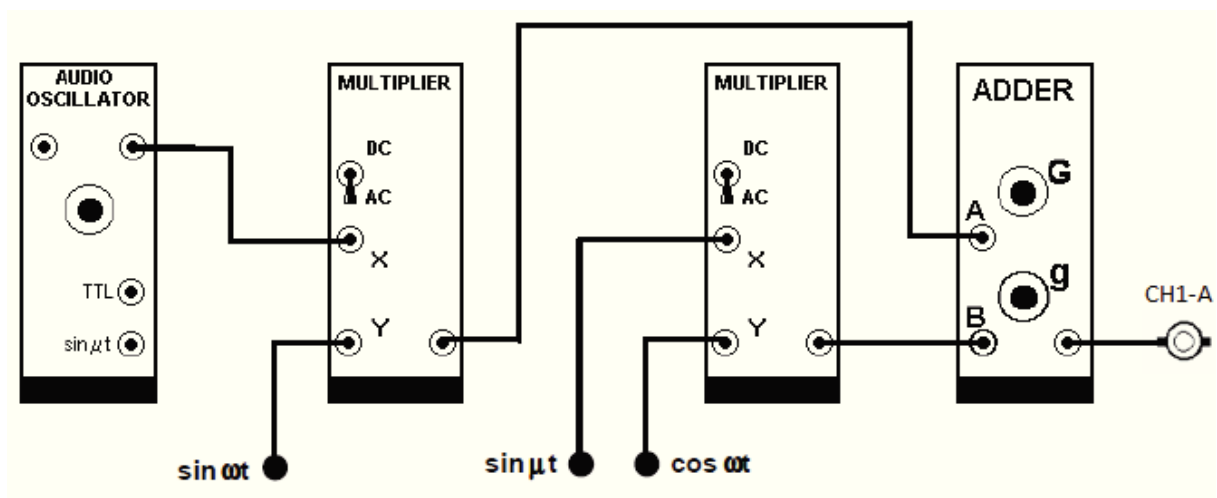
6.2 Kvadrátúrna amplitúdová modulácia

Kvadrátúrna amplitúdová modulácia (QAM) je založená na princípe, že najskôr sa vytvoria dve amplitúdové modulácie, ktorých nosné vlny sú vzájomne posunuté o 90° a následne sa spočítajú v sčítavači.



Obrázok 6.4 Bloková schéma zapojenia kvadrátúrnej amplitúdovej modulácie

Bloková schéma uvedená na obr. 6.3 znázorňuje zapojenie modulov v systéme TIMS.



Obrázok 6.5 Schéma zapojenia QAM modulácie

Modulácia QAM sa skladá z dvoch samostatných modulačných signálov a dá sa vyjadriť vzt'ahom:

$$QAM = R\{[I(t) + iQ(t)]e^{i2\pi f_0 t}\} = I(t) \cos(2\pi f_0 t) - Q(t) \sin(2\pi f_0 t) \quad (6.2)$$

kde:

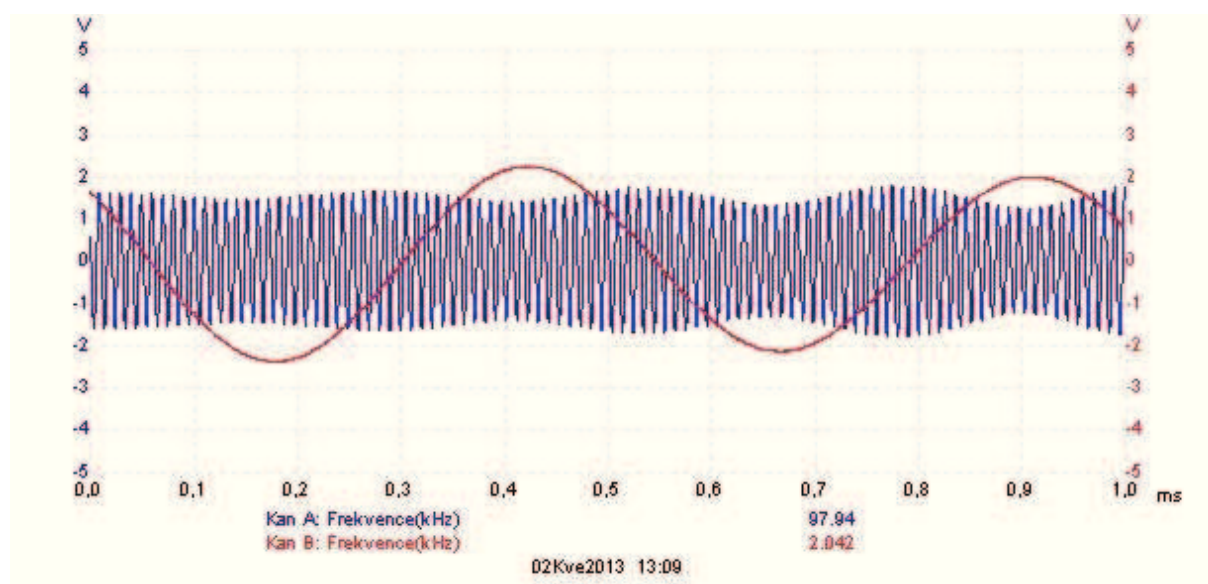
$$i^2 = -1$$

$I(t), Q(t)$ - modulačné signály

f_0 - frekvencia nosnej vlny

$R\{\}$ - reálna zložka

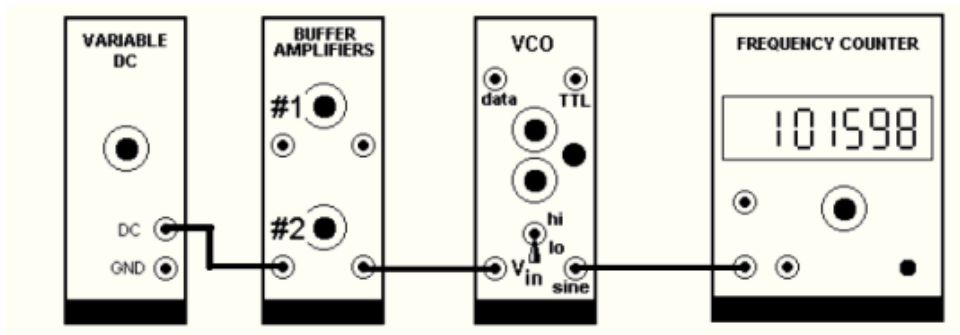
Toto zapojenie je podstatne jednoduchšie ako zapojenie pri amplitúdovej modulácii. Najskôr sa zapoja všetky moduly podľa schémy na obr. 6.2, ale výstupy z modulov MULTIPLIER sa ešte nezapájajú. Výstupy $\sin \omega t$, $\sin \mu t$ a $\cos \omega t$ sa nachádzajú na module MASTER SIGNALS. Frekvencia na module AUDIO OSCILLATOR sa nastaví približne na 2 kHz. Je potrebné skontrolovať či je na výstupe oboch modulov MULTIPLIER amplitúdová modulácia s oboma postrannými pásmami. Pritom sa upraví časová základňa osciloskopu aby boli zobrazené dve až tri periódy modulovanej vlny. Zapojí sa výstup prvého modulu MULTIPLIER do vstupu A na module ADDER. Otáčaním potenciometra „G“ sa nastaví amplitúda signálu na 1 V. Odpojí sa vstup A a zapojí sa druhý modul MULTIPLIER do vstupu B modulu ADDER. Amplitúda signálu sa nastaví na 1 V pomocou potenciometra „g“. Zapojí sa znovu vstup A modulu ADDER. Teraz by mala byť na výstupe modulu ADDER (CH1-A) kvadrátúrna amplitúdová modulácia, ktorá má amplitúdu takmer 1,5 V.



Obrázok 6.6 Vzhľad QAM modulácie pri nosnej frekvencii 100 kHz a modulačnej frekvencii 2 kHz

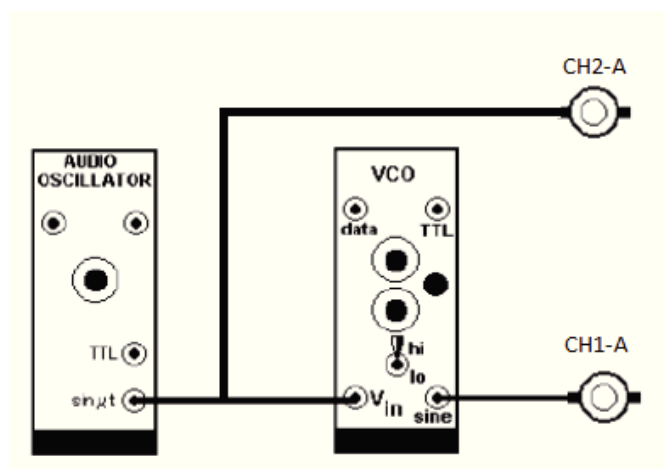
6.3 Frekvenčná modulácia

V súčasnosti najpoužívanejšia analógová modulácia využíva modul VCO (Voltage Controlled Oscillator) s analógovým vstupom. Najskôr sa nakalibruje VCO modul na požadovanú citlivosť a následne sa vymodeluje frekvenčná modulácia.



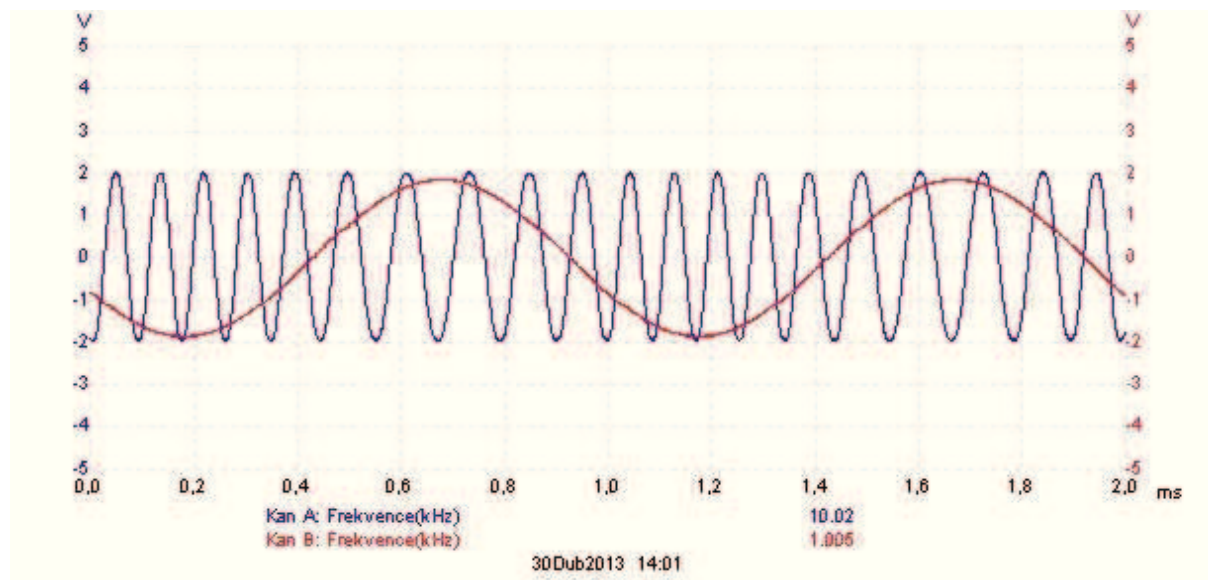
Obrázok 6.7 Schéma zapojenia kalibrácie modulu VCO

Ešte pred samotným zapojením modulu VCO je potrebné prepnúť operačný mód na VCO prepínačom umiestneným na plošnom spoji modulu. Po zapojení do stanice sa prepne prepínač na prednej strane modulu na „LO“ a potenciometer GAIN sa pretočí úplne doľava. Prepínač LO/HI slúži na zmenu rozsahu frekvencie nosnej vlny v module VCO. LO má rozsah od 1,5 kHz do 17 kHz a HI má rozsah od 70 kHz do 130 kHz. Následne sa moduly zapoja podľa schémy na obr. 6.7. Frekvencia na module VCO sa nastaví na 10 kHz s použitím potenciometru f_0 čo je síce nižšia frekvencia ako používa rozhlasové FM vysielanie, ale pre potreby merania je dostačujúca. Výstup na module VARIABLE DC sa nastaví na približne +2 V. Potenciometrom na BUFFER #2 sa nastaví DC zložka na vstupe modulu VCO presne na -1 V. Následne je potrebné zvyšovať hodnotu GAIN pokiaľ sa frekvencia nezmeni o 1 kHz. Smer zmeny závisí od polarizácie jednosmernej zložky. VCO je teraz kalibrované na citlivosť zmeny frekvencie nosného signálu v závislosti na zmene amplitúdy modulačného signálu na 1 kHz na 1 V. V prípade potreby sa môže jednoducho nastaviť aj iná citlivosť VCO. Odteraz je výhodné ponechať nastavenie VCO bezo zmeny.



Obrázok 6.8 Schéma zapojenia FM modulácie

Takto nastavený modul VCO je pripravený na frekvenčnú moduláciu vstupného signálu. Odpoja sa moduly VARIABLE DC a BUFFER AMPLIFIERS a vymenia sa za modul AUDIO OSCILLATOR podľa schémy na obr. 6.8. Výstup z VCO sa zapojí do osciloskopu na CH1-A a výstup z modulu AUDIO OSCILLATOR sa zapojí na kanál CH2-A. Frekvencia na module AUDIO OSCILLATOR sa nastaví v rozmedzí 300 Hz až 3 400 Hz. Pokiaľ bol návod dodržaný, tak na výstupe VCO bude frekvenčne modulovaný signál s citlivosťou 1 kHz na volt. [8]



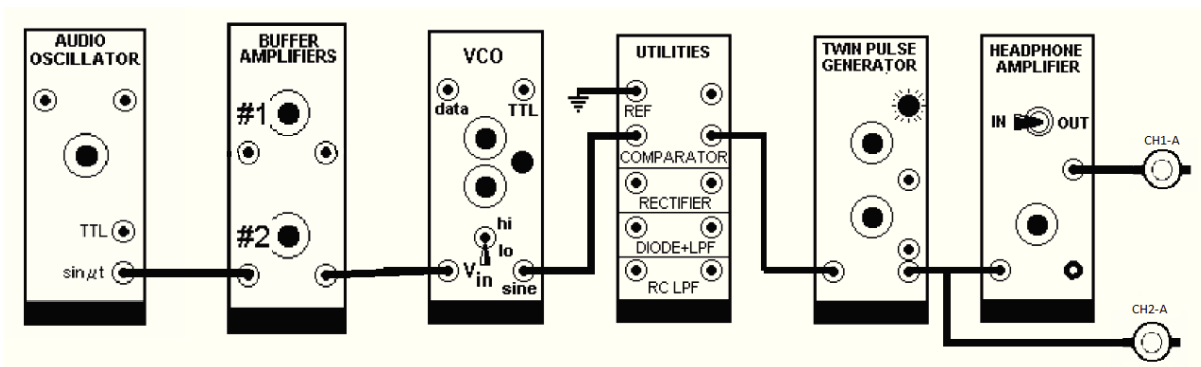
Obrázok 6.9 Vzhľad frekvenčnej modulácie pri nosnej frekvencii 10 kHz

7 Demodulátory frekvenčnej modulácie

V nasledujúcich meraniach sú spracované vlastnosti Zero crossing demodulátora a Phase locked loop demodulátora pri nosných frekvenciách 10 kHz a 100 kHz. Pri oboch demodulátoroch sú spracované závislosti veľkosti amplitúdy modulačného signálu na veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu a pri Zero crossing demodulátore je spracovaná závislosť veľkosti impulzu na veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu.

7.1 Zero crossing (ZX) demodulátor frekvenčnej modulácie

V tomto meraní sa vytvorí modulátor a demodulátor FM signálu a odmerajú sa závislosti veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu k amplitúde modulačného signálu a závislosť šírky pulzu vytvoreného modulom TWIN PULSE GENERATOR na veľkosť jednosmernej zložky demodulovaného signálu, ktoré sa generujú vždy pri kladnej zmene modulovaného FM signálu. Všetky hodnoty amplitúdy signálu sa vzťahujú na veľkosť amplitúdy od kladnej špičky po zápornú špičku.



Obrázok 7.5 Schéma zapojenia Zero Crossing demodulátora FM

Najskôr sa zapoja moduly podľa schémy uvedenej na obr.7.5. Použijú sa pritom moduly AUDIO OSCILLATOR, BUFFER AMPLIFIERS, VOLTAGE CONTROLLED OSCILLATOR (VCO), UTILITIES, TWIN PULSE GENERATOR a HEADPHONE AMPLIFIER. AUDIO OSCILLATOR simuluje modulačný signál a nastaví sa na 2 kHz. BUFFER AMPLIFIERS sa použije na zvyšovanie amplitúdy modulačného signálu pri meraní závislosti veľkosti amplitúdy modulačného signálu k veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu. VCO vytvorí frekvenčnú moduláciu signálu. Týmto je FM generátor hotový.

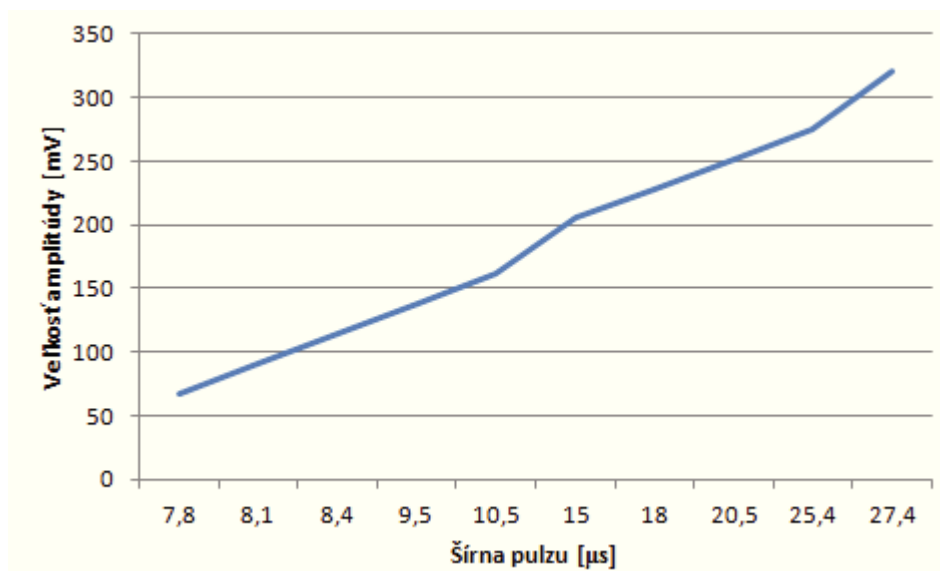
Následne sa signál demoduluje. Komparátor modulu UTILITIES zmení pôvodne analógový FM signál na diskretný a to tak, že pri záporných hodnotách FM signálu bude na jeho výstupe 0 V a pri kladných hodnotách 5 V. Taktýto signál následne vstúpi do TWIN PULSE GENERATOR, ktorý pri každej vzostupnej hrane TTL signálu vygeneruje pulz. Jeho šírka závisí od potenciometra WIDTH, ktorá takisto ovplyvňuje veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu. Ako posledný je modul HEADPHONE AMPLIFIER, ktorý musí byť nastavený do polohy IN. Na jeho výstupe je demodulovaný analógový signál, ktorého amplitúda sa dá meniť pomocou potenciometra. Pri meraniach je potenciometer nastavený na strednú hodnotu. Takto zapojený FM modulátor a demodulátor je pripravený na merania.

7.1.1 Meranie zmeny amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na šírke pulzu pri nosnej frekvencii 10 kHz

Prvé meranie FM demodulátora je závislosť šírky TTL signálu generovaného modulom TWIN PULSE GENERATOR k veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu pri frekvencii nosnej vlny 10 kHz. Výstup modulu BUFFER AMPLIFIER sa nastaví na veľkosť amplitúdy 2 V. Bolo uskutočnených 10 meraní od najmenej šírky impulzu, ktorá je 7,8 μs až po najväčšiu šírku impulzu, ktorá je 27,4 μs . Cieľom merania bolo určiť, ako vplýva šírka impulzu na veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu.

Tabuľka 7.1 Namerané hodnoty amplitúdy demodulovaného signálu pri nosnej frekvencii 10 kHz

Šírka impulzu [μs]	Veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu [mV]
7,8	136
8,1	183
8,4	229
9,5	275
10,5	322
15	412
18	456
20,5	503
25,4	550
27,4	642



Obrázok 7.6 Graf závislosti šírky impulzu na veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu ZX demodulátora pri nosnej frekvencii 10 kHz

Z grafu vyplýva, že zmena veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu sa mení v celom rozsahu takmer lineárne v závislosti na zmene šírky pulzu vytvoreného modulom TWIN PULSE GENERATOR.

7.1.2 Meranie zmeny amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na šírke pulzu pri nosnej frekvencii 100 kHz

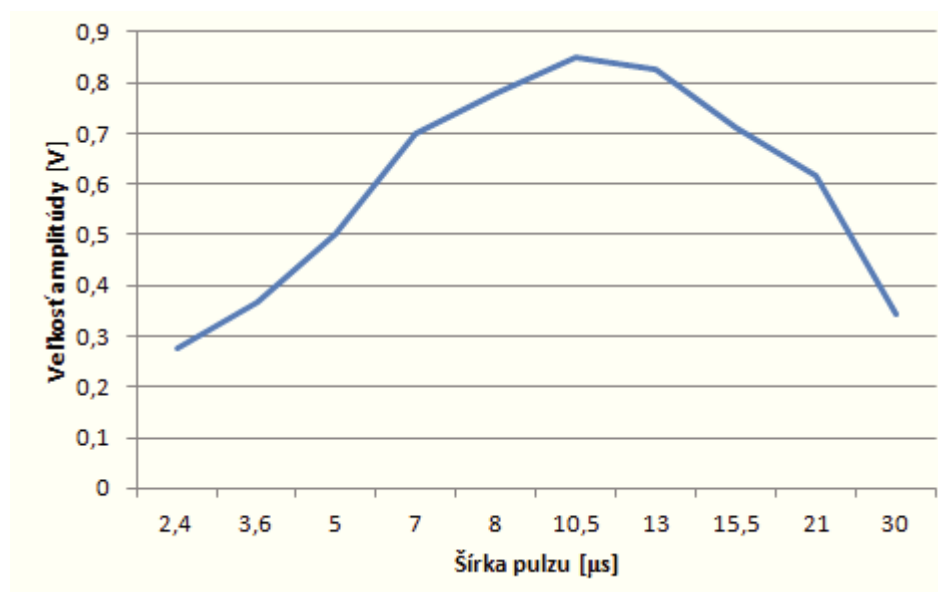
Druhé meranie ukazuje zmenu veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na zmene šírky impulzu pri nosnej frekvencii 100 kHz. Pri tomto meraní sa odmerajú šírky impulzov z modulu TWIN PULSE GENERATOR od 2,4 μs až po maximum 30 μs . Podľa vzťahu:

$$T = \frac{1}{f} \quad (7.2)$$

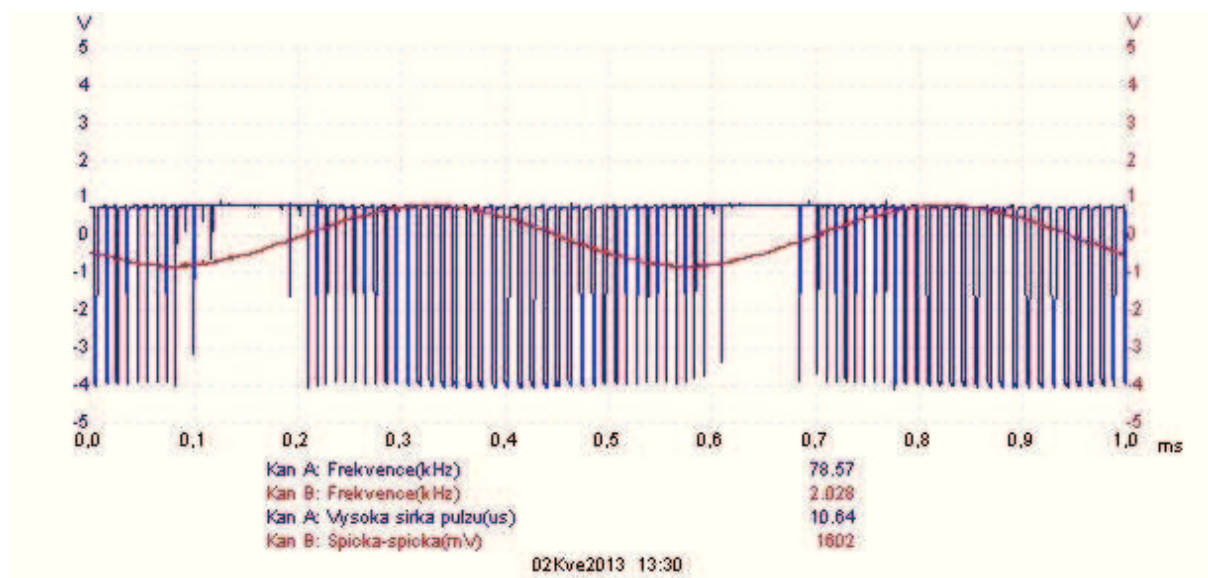
vyplýva, že pri frekvencii 100 kHz je perióda signálu presne 10 μs . Väčšia šírka pulzu spôsobí znehodnotenie demodulovaného signálu.

Tabuľka 7.2 Namerané hodnoty amplitúdy demodulovaného signálu pri nosnej frekvencii 100 kHz

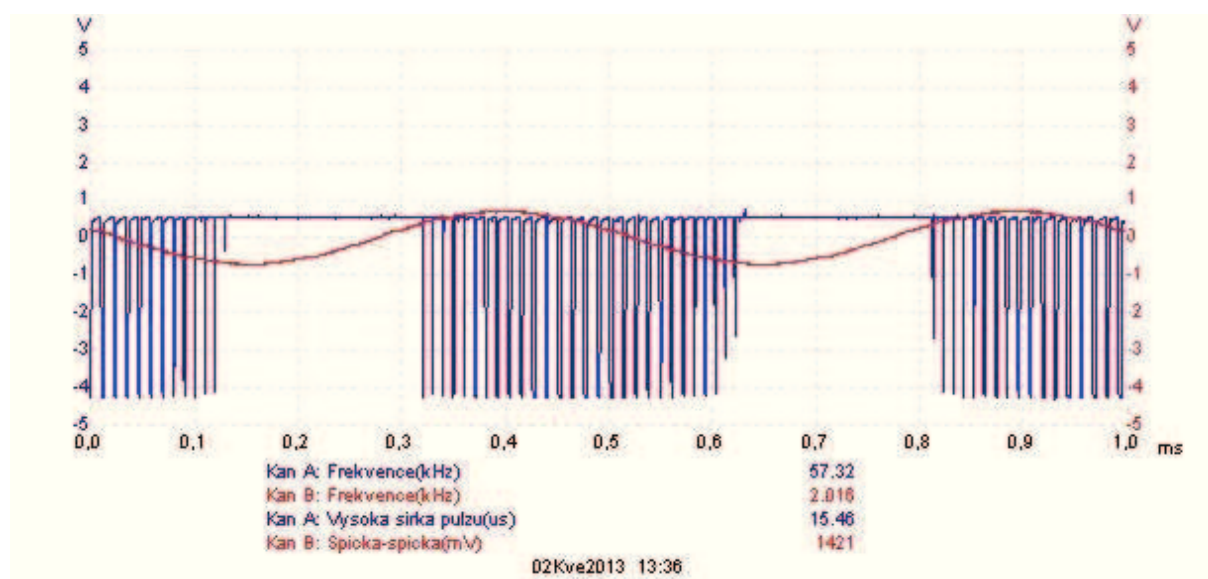
Šírka impulzu [μs]	Veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu [V]
2,4	0,55
3,6	0,732
5	1
7	1,4
8	1,56
10,5	1,7
13	1,65
15,5	1,421
21	1,236
30	0,688



Obrázok 7.7 Graf závislosti šírky impulzu na veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu ZX demodulátora pri nosnej frekvencii 100 kHz



Obrázok 7.8 Vzhľad demodulovaného signálu a pulzov pri šírke pulzu 10,64 μ s



Obrázok 7.9 Vzhľad demodulovaného signálu a pulzov pri šírke pulzu 15,46 μ s

Meranie ukázalo, že veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu sa zvyšuje v závislosti na zväčšovaní pulzu až po šírku pulzu 10 μ s. Pri väčších šírkach impulzov sa amplitúda demodulovaného signálu znižuje a úplne sa stratí pri šírke impulzu 30 μ s. Na obr. 7.8 a obr. 7.9 je viditeľné ako sa impulzy strácajú, pri šírkach pulzu väčších ako 10 μ s. V prípade nemodulovaného signálu by došlo k splynutiu impulzov presne pri šírke impulzu 10 μ s. Pri modulovanom signále mohla byť šírka impulzu väčšia ako 10 μ s vďaka tomu, že frekvencia bola menšia pri stúpajúcej amplitúde modulačného signálu.

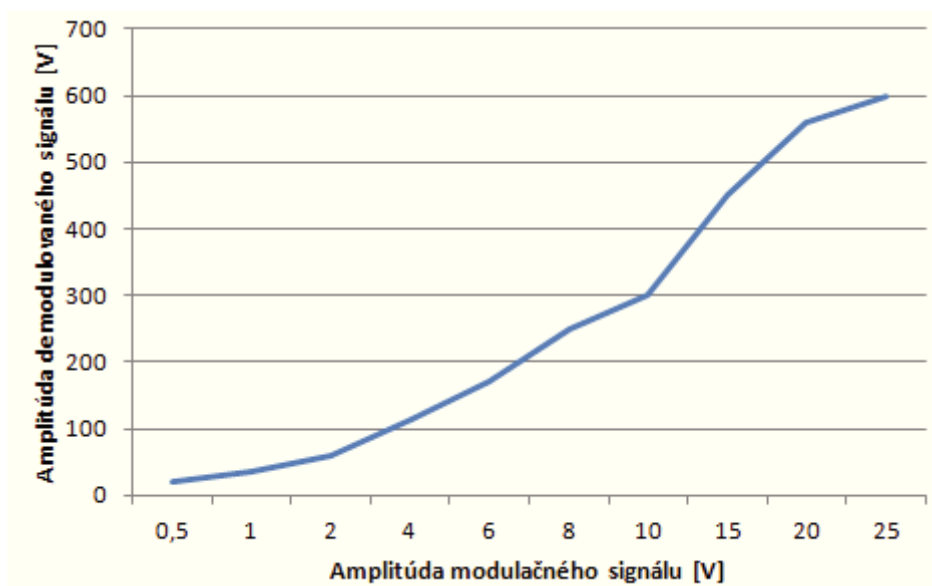
Pri porovnaní výsledkov nameraných pri nosných frekvenciách 10 kHz a 100 kHz je viditeľné, že výhodnejšie hodnoty veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu nastávajú pri nosnej frekvencii 100 kHz. Nevýhodou je, že šírka impulzu musí byť do 10 μ s.

7.1.3 Meranie zmeny amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na zmene amplitúdy modulačného signálu ZX demodulátora pri nosnej frekvencii 10 kHz

Toto meranie sa zaoberá vplyvom veľkosti amplitúdy modulačného signálu na veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu pri nosnej frekvencii 10 kHz. K ovplyvňovaniu veľkosti amplitúdy modulačného signálu sa použije modul BUFFER AMPLIFIER. Pri tomto meraní bude potenciometer WIDTH na module TWIN PULSE GENERATOR nastavený na šírku pulzu 5 μ s. Celkovo sa vykoná 10 meraní pri rôznych veľkostiach amplitúdy modulačného signálu a vytvorí sa pomer amplitúdy demodulovaného signálu k modulačnému signálu.

Tabuľka 7.3 Namerané hodnoty veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu pri nosnej frekvencii 10 kHz

Amplitúda modulačného signálu [V]	Amplitúda demodulovaného signálu [mV]	Pomer amplitúdy demodulovaného signálu k modulačnému
0,5	20	4,00%
1	36	2,00%
2	60	1,00%
4	115	0,50%
6	170	0,33%
8	250	0,25%
10	300	0,20%
15	450	0,13%
20	560	0,10%
25	600	0,08%



Obrázok 7.10 Graf závislosti veľkosti amplitúdy modulačného signálu na veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu ZX demodulátora pri nosnej frekvencii 10 kHz

Graf ukazuje, že amplitúda demodulovaného signálu sa mení mierne exponenciálne v závislosti na zmene veľkosti amplitúdy modulačného signálu až kým pri šírke impulzu 25 μ s

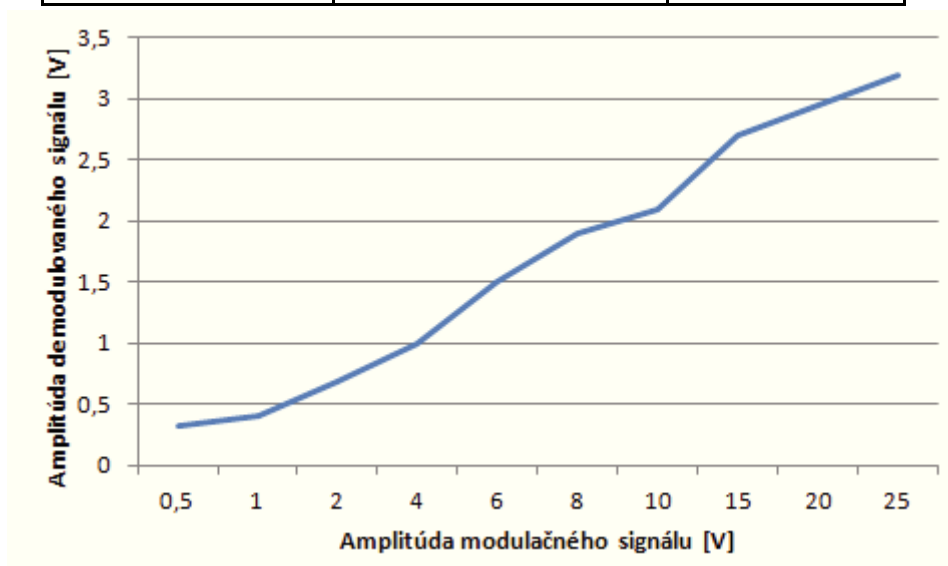
nedosiahne maximum 600 mV. Pomer amplitúdy demodulovaného signálu k amplitúde modulačného signálu je najvyšší pri veľkosti amplitúdy modulačného signálu 0,5 V a postupne klesá.

7.1.4 Meranie zmeny amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na zmene amplitúdy modulačného signálu ZX demodulátora pri nosnej frekvencii 100 kHz

Posledné meranie zamerané na Zero crossing demodulátor je zmena amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na zmene amplitúdy modulačného signálu pri nosnej frekvencii 100 kHz a určenie pomeru demodulovaného signálu k modulačnému signálu.

Tabuľka 7.4 Namerané hodnoty veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu pri nosnej frekvencii 100 kHz

Amplitúda modulačného signálu [V]	Amplitúda demodulovaného signálu [V]	Pomer demodulovaného signálu k modulačnému
0,5	0,32	64,00%
1	0,4	40,00%
2	0,68	34,00%
4	1	25,00%
6	1,5	25,00%
8	1,9	23,75%
10	2,1	21,00%
15	2,7	18,00%
20	2,95	14,75%
25	3,2	12,80%



Obrázok 7.11 Graf závislosti veľkosti amplitúdy modulačného signálu na veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu ZX demodulátora pri nosnej frekvencii 100 kHz

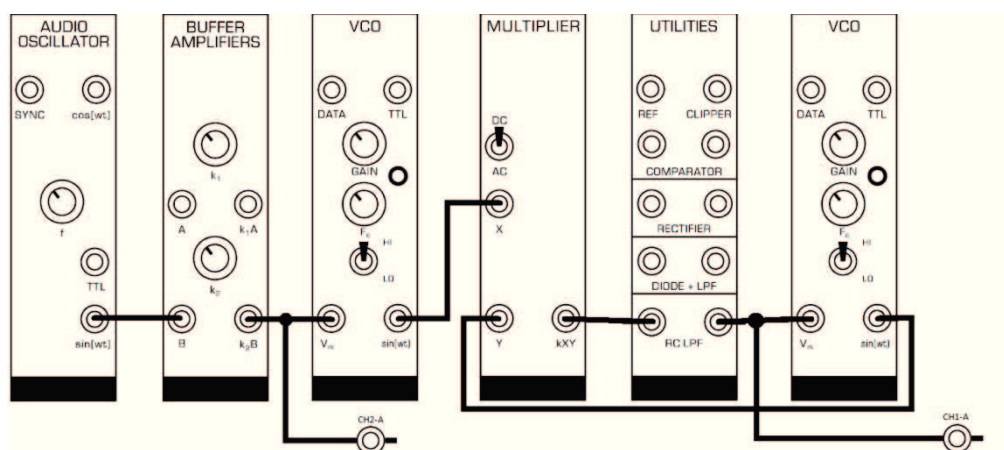
Meranie ukázalo, že veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu sa mení takmer lineárne so zmenou amplitúdy modulačného signálu. Ďalej meranie ukázalo, že pri menšej amplitúde modulačného signálu je pomer demodulovaného signálu k modulačnému signálu vyšší.

Pri porovnaní pomerov demodulovaných signálov k modulačným pri nosných frekvenciách 10 kHz a 100 kHz je viditeľné, že pri nosnej frekvencii 100 kHz je pomer demodulovaného signálu k modulačnému signálu výhodnejší a že menšie amplitúdy modulačných signálov sa demodulujú vernejšie. [8]

7.2 Phase Locked Loop (PLL) demodulátor frekvenčnej modulácie

V tomto meraní sa sp racuje závislosť veľkosti amplitúdy modulačného signálu k veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu. Určí sa maximálna veľkosť amplitúdy modulačného signálu pri ktorej ešte nedochádza k degradácii demodulovaného signálu a následne sa porovnajú namerané výsledky s výsledkami nameranými pri Zero Crossing demodulátore.

PLL generuje výstupný signál, ktorého fáza sa vzťahuje k fáze vstupného signálu. Jedná sa o elektronický obvod skladajúci sa z dolnej priepuste a frekvenčného oscilátora. Fáza a frekvencia modulovaného vstupného signálu musia byť rovnaké ako fáza a frekvencia generovaná oscilátorom v demodulátore. V module MULTIPLIER sa namoduluje vstupný FM signál so spätnou väzbou demodulátora. Takto modulovaný signál prejde cez dolnú pripusť modulu UTILITIES, ktorá odstráni vysoké frekvencie spôsobené spätnou väzbou.



Obrázok 7.12 Schéma zapojenia Phase Locked Loop demodulátora FM

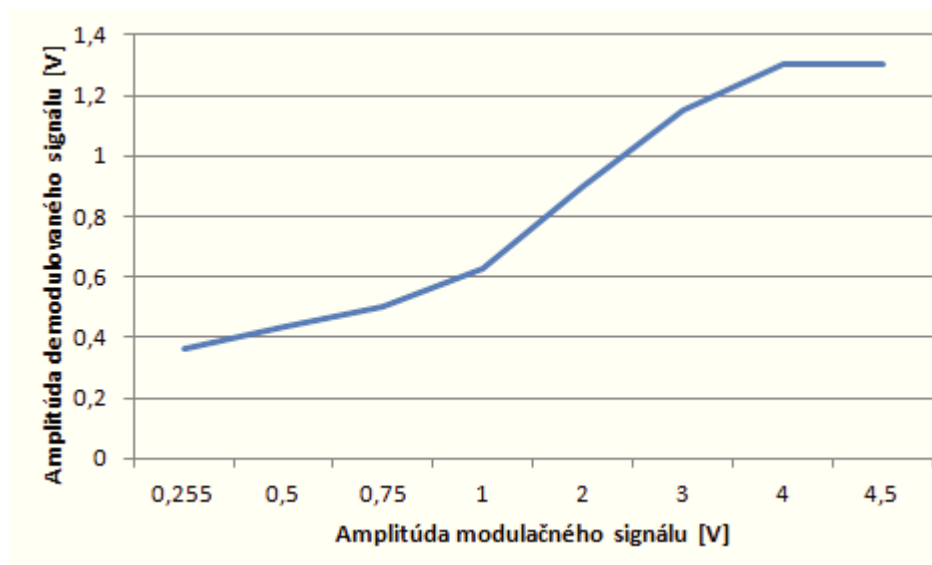
Moduly sa zapoja podľa schémy uvedenej na obr. 7.12. Potenciometre GAIN a f_0 na module VCO v demodulátore sa nastavujú na rovnake hodnoty ako sú nastavené hodnoty na module VCO modulátora. Modulačná frekvencia sa nastaví na 2 kHz.

7.2.1 Meranie zmeny amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na zmene amplitúdy modulačného signálu PLL demodulátora pri nosnej frekvencii 10 kHz

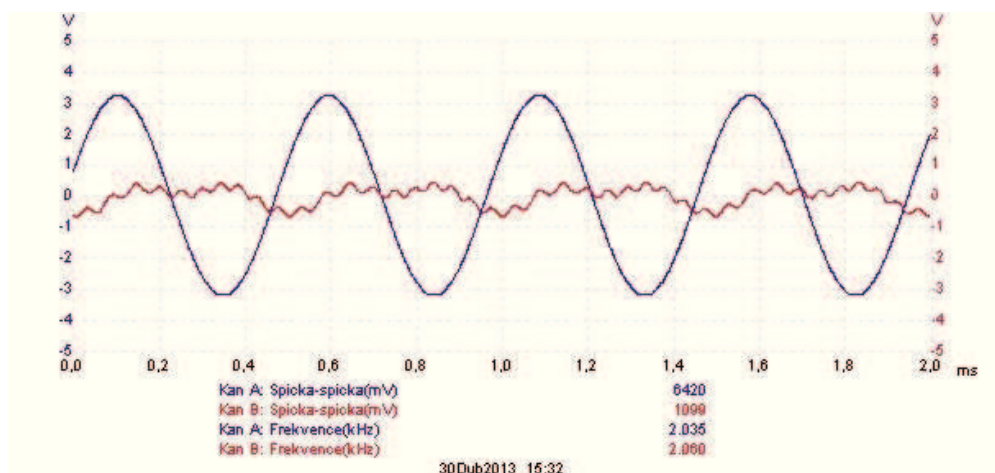
V prvom meraní sa spracuje vplyv veľkosti amplitúdy modulačného signálu na veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu pri nosnej frekvencii 10 kHz a citlivosti 1 kHz.

Tabuľka 7.5 Namerané hodnoty veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu pri nosnej frekvencii 10 kHz

Amplitúda modulačného signálu [V]	Amplitúda demodulovaného signálu [V]	Pomer amplitúdy demodulovaného signálu k modulačnému
0,255	0,361	141,57%
0,5	0,433	86,60%
0,75	0,5	66,67%
1	0,63	63,00%
2	0,9	45,00%
3	1,15	38,33%
4	1,3	32,50%
4,5	1,3	28,89%



Obrázok 7.13 Graf závislosti veľkosti amplitúdy modulačného signálu na veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu PLL demodulátora pri nosnej frekvencii 10 kHz



Obrázok 7.14 Vzhľad deformácie demodulovaného signálu pri nosnej frekvencii 10 kHz.

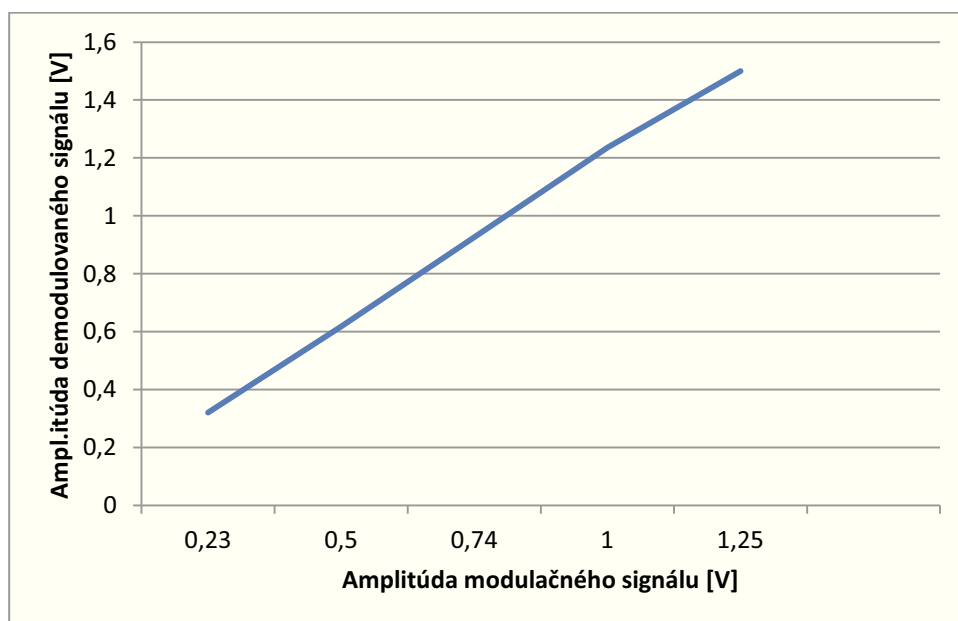
Z grafu na obr. 7.13 vyplýva, že amplitúda demodulovaného signálu sa v istých oblastiach mení lineárne s amplitúdou modulačného signálu. V celom priebehu sa ale mení mierne exponenciálne a pri veľkosti amplitúdy väčšej ako 4,5 V dochádza k nedemodulovateľnej deformácii signálu ako ukazuje obr. 7.14, kde na kanáli A je znázornený modulačný signál a na kanáli B je deformovaný demodulovaný signál. Pri porovnaní veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu k veľkosti amplitúdy modulačného signálu klesá vernosť demodulovaného signálu so zvyšujúcou sa amplitúdou modulačného signálu.

7.2.2 Meranie zmeny amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na zmene amplitúdy modulačného signálu PLL demodulátora pri nosnej frekvencii 100 kHz

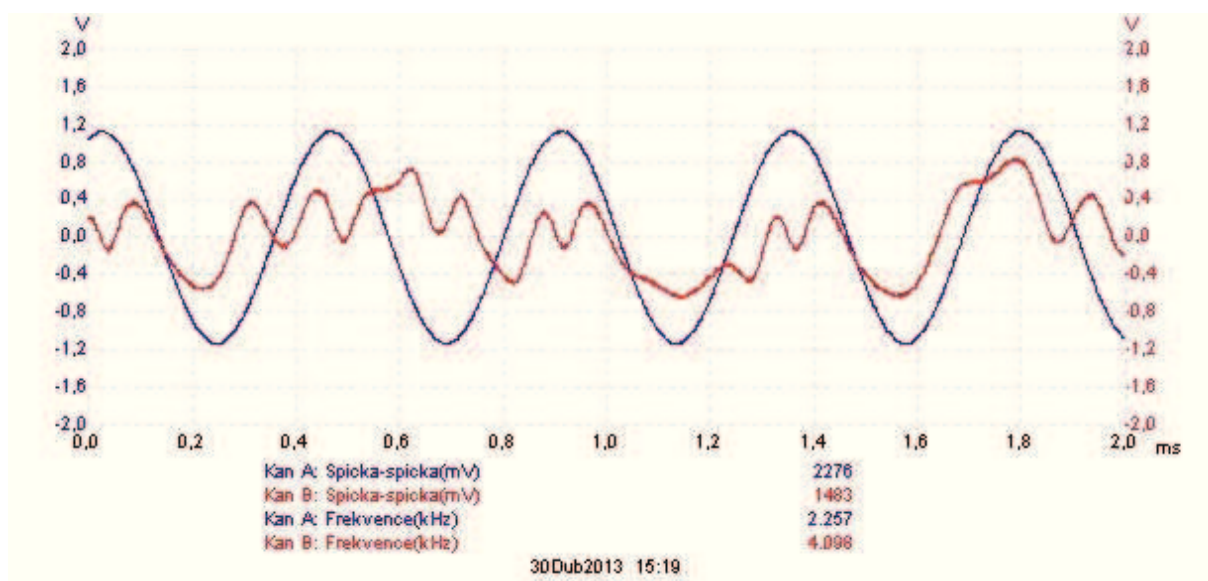
Druhé meranie určí závislosť veľkosti modulačného signálu k demodulovanému signálu pri nosnej frekvencii 100 kHz. Odmerajú sa hodnoty demodulovaného signálu až kým nenastane deformácia demodulovaného signálu.

Tabuľka 7.6 Namerané hodnoty veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu pri nosnej frekvencii 100 kHz

Amplitúda modulačného signálu [V]	Amplitúda demodulovaného signálu [V]	Pomer amplitúdy demodulovaného signálu k modulačnému
0,23	0,32	139,13%
0,5	0,618	123,60%
0,74	0,926	125,14%
1	1,236	123,60%
1,25	1,5	120,00%



Obrázok 7.15 Graf závislosti veľkosti amplitúdy modulačného signálu na veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu PLL demodulátora pri nosnej frekvencii 100 kHz



Obrázok 7.16 Vzhľad deformácie demodulovaného signálu pri nosnej frekvencii 100 kHz.

Podľa grafu znázorneného na obr. 7.15 sa pri nosnej frekvencii 100 kHz mení veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu lineárne v závislosti na zmene veľkosti amplitúdy modulačného signálu až do amplitúdy modulačného signálu 1,25 V, nad ktorou dochádza k nedemodulovateľnej deformácii demodulovaného signálu ako ukazuje obr. 7.16. Pri porovnaní veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu k amplitúde modulačného signálu dochádza k situácii, kedy je veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu väčšia ako amplitúda modulačného signálu. [8]

8 Záver

Cieľom bakalárskej práce bolo vytvoriť merania a protokoly na vybranú analógovú moduláciu. V meraniach som porovnával dva typy demodulátorov, a to Zero crossing demodulátor a Phase locked loop demodulátor. Pri oboch som meral veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na zmene veľkosti amplitúdy modulačného signálu pri nosných frekvenciách 10 kHz a 100 kHz. Pri porovnaní nameraných hodnôt amplitúd modulačného a demodulovaného signálu pri nosných frekvenciách 10 kHz a 100 kHz som zistil, že oba demodulátory dosahujú lepšiu vernosť demodulovaného signálu pri nosnej frekvencii 100 kHz.

Následne som porovnal oba demodulátory podľa nameraných hodnôt pri nosnej frekvencii 100 kHz. Podľa nameraných výsledkov je zjavné, že Phase locked loop demodulátor dosahuje lepšiu vernosť demodulovaného signálu, ale neumožňuje demoduláciu pokiaľ je amplitúda modulačného signálu väčšia ako $1,25 V_{p-p}$, keďže pri vyšších amplitúdach dochádza k deštruktívnej deformácii demodulovaného signálu (vid'. *obr. 7.16*). Naproti tomu Zero crossing demodulátor síce nedosahuje takú vernosť signálu ako Phase locked loop demodulátor, ale bez vážneho skreslenia demoduloval aj signál, ktorého modulačná amplitúda bola $25 V_{p-p}$.

Pri meraní veľkosti amplitúdy demodulovaného signálu v závislosti na zmene šírky pulzu využívaného pri demodulácii pomocou Zero crossing demodulátora som taktiež zistil, že demodulátor dosahuje lepšie výsledky pri nosnej frekvencii 100 kHz. Pri tejto nosnej frekvencii mohla byť šírka pulzu maximálne 10 μs . Pri väčšej šírke pulzu klesala veľkosť amplitúdy demodulovaného signálu až sa úplne stratila pri šírke pulzu 30 μs .

Použitá literatura

- [1] DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD. Moderní radiotechnika. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 767 s. ISBN 80-730-0132-2.
- [2] Aviation Radio Bands and Frequencies. S-meter [online]. 2013 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.smeter.net/spectrum/aviation.php>
- [3] Mobiltelefonens historie i Norge - Norsk Telemuseum. Internet Archive: Wayback Machine [online]. 2007 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://web.archive.org/web/20070213045903/http://telemuseum.no/mambo/content/view/29/1/>
- [4] Museets omrden - Landmobil radio. Radiomuseet i Göteborg | Sveriges mest kompletta radiomuseum [online]. 2007 [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.radiomuseet.se/omraden/landmobil.html>
- [5] GSM Terms. VOLNÝ.cz [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/drd/gsm/GSMTerms.html>
- [6] Co je to CB. CB monitor [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: http://www.cbmonitor.cz/co_je_cb.php
- [7] HOOPER, Tim. EMONA INSTRUMENTS PTY LTD. Communication Systems Modelling: Volume A1 Fundamental Analog Experiments. Australia, 2005.
- [8] HOOPER, Tim. EMONA INSTRUMENTS PTY LTD. Communication Systems Modelling: Volume A2 Further & Advanced Analog Experiments. Australia, 2005.

Zoznam príloh

Súčasťou BP je CD.

Adresárová štruktúra priloženého CD:

\protokoly\Nové zadanie merania FM demodulátorov

\protokoly\Protokol merania FM demodulátorov

\návody\Popis použitých modulov TMS